EFICIÊNCIA ECONÓMICA NA OPERAÇÃO DE ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Ana Isabel Fragoso Lopes Ventura da Costa

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA DO AMBIENTE — ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO

Orientador FEUP: Professor Doutor Manuel Maria Pacheco Figueiredo

---

Orientador Águas do Cávado, SA: Engenheiro Nuno Aguilar

JULHO DE 2009

AGRADECIMENTOS

Desejo agradecer a todas as pessoas que, directa ou indirectamente, contribuíram para a realização desta tese de mestrado, em especial:

- Ao meu orientador Professor Manuel Maria Pacheco Figueiredo pelo sua disponibilidade e por todo o apoio no esclarecimento de dúvidas que surgiram no decorrer deste estudo;
- Ao Eng. Ricardo Ferreira (Águas do Cávado, S.A.) pela disponibilidade que sempre demonstrou no decorrer deste processo.
- A todos os trabalhadores da Águas do Cávado, S.A. pela disponibilidade na cedência de dados necessários no decorrer deste trabalho.
- Ao Eng. Nuno Aguilar e ao Eng. Paulo Rêgo pelo apoio e compreensão demonstrados durante a evolução da presente investigação.
- Aos meus pais, irmãs e amigos pela paciência e atenção em ouvir-me, e pela ajuda em renovar a energia e entusiasmo.

RESUMO

Nos sistemas de abastecimento de água, a elevação da água representa uma grande fatia no custo total de energia eléctrica. Devido ao significativo consumo eléctrico, necessário para elevar água dos sistemas de bombeamento para os reservatórios, uma redução anual no custo de 1 ou 2% pode significar uma poupança de vários milhares de euros. A definição de uma política operacional óptima das bombas tem vindo a tornar-se uma metodologia prática e eficaz para atingir a eficiência económica nos sistemas, sem a necessidade de alterar as infra-estruturas dos mesmos. A variação ao longo do dia do tarifário de energia eléctrica torna este problema mais complexo, pois é necessário reduzir o tempo de funcionamento das bombas durante o período que corresponde aos escalões de energia mais caros. Devido a isso, no presente estudo divide-se o dia em intervalos correspondentes aos períodos tarifários de energia (para a hora legal de Verão existirão 6 períodos, e para a de Inverno 8 períodos). Procura-se desenvolver um algoritmo para cálculo da melhor combinação de bombas em cada período de tarifário de energia utilizando um modelo de controlo cuja função objectivo engloba o custo da energia mas também uma segunda parcela que busca a regularidade da operação (minimização dos arranques e paragens dos grupos elevatórios). Esse algoritmo é desenvolvido em linguagem Matlab com recurso a uma Toolbox de comunicação com o EPANET 2.0, cuja finalidade é a leitura das características dos componentes físicos e não físicos da rede a optimizar. O programa criado foi aplicado a parte do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água ao Baixo Cávado e Ave, para dois dias do ano distintos correspondentes ao período de hora legal de Verão e Inverno. Após a optimização da política operacional pelo programa desenvolvido, os resultados foram simulados no EPANET, obtendo-se pequenas diferenças entre o custo calculado pelo último e pelo programa: para o dia de hora legal de Verão obteve-se um custo inferior em 2 % no simulador (devido à impossibilidade de cumprimento dos níveis de água inicial e final no reservatório em cada período) e, para o de Inverno o custo é praticamente igual nos dois casos. O programa desenvolvido tem também a funcionalidade de avaliar economicamente a tomada de algumas decisões relativas ao sistema (como por exemplo aumentar o rendimento dos grupos elevatórios).

Palavras-Chave: abastecimento de água, eficiência económica, estações elevatórias, política operacional, optimização.

ABSTRACT

In water supply systems, pumping water represents a large share in the total cost of electricity. Due to high electricity consumption to pump water from pumping stations for tanks, an annual reduction of 1 or 2% can mean a saving of several thousand euros. The definition of an optimal operational policy of pumps has become a practical and effective approach to achieve economic efficiency in these systems without the need to change the infrastructure. The variation throughout the day of electricity charge makes this problem more complex, it is necessary to reduce the time of operation of pumps during the period that corresponds to more expensive energy. In this study the day is divided in intervals corresponding to periods of energy charge (for summer legal hour are 6 periods and 8 for the winter). The aim of this study is to develop an algorithm for optimizing pump scheduling in each period using a model whose objective function includes the cost of energy but also a second term that seeks the regulation of the operation (minimization of pump switches). This algorithm is developed in Matlab language using a Toolbox of communication with EPANET 2.0, whose purpose is to read the characteristics of physical and non-physical components from the network to be optimized. The program was applied to the Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água ao Baixo Cávado e Ave, for two different days of the year, corresponding to the summer and winter legal hour. After optimizing the operational policy, the results were simulated in EPANET, resulting in small differences between the simulated and the calculated total cost: for the summer legal time the cost after the simulation was 2% lower than the one that was calculated (it's due to the impossibility to achieve the initial and final levels of water in the reservoir in each period), and for winter legal time the cost is almost the same in both cases. The program has also the functionality to assess the cost of taking some decisions on the system (eg increase the performance of the pumps).

Keywords: economic efficiency, pump scheduling, pumping stations, optimization, water supply systems.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABELAS

ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AdC – Águas do Cávado, SA

CCB – Curva Característica da Bomba

CRB – Curva de Rendimento da Bomba

EE – Estação elevatória

ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

ETA - Estação de Tratamento de Água

GE – Grupo Elevatório

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MATLAB – Matrix Laboratory

RNF – Reservatório de Nível Fixo

RNV – Reservatório de Nível Variável

V – Volume de Água

1

INTRODUÇÃO

Nos sistemas de abastecimento de água, é nos equipamentos elevatórios que se verifica maior consumo energético representando este, a maior fatia no custo total de energia eléctrica. Na maioria das estações elevatórias investimentos em pequenas modificações das bombas ou mudanças operacionais podem resultar numa redução significativa do custo com a energia eléctrica. Devido a isso, a definição de uma política operacional óptima das bombas tem vindo a tornar-se uma metodologia prática e eficaz para atingir a eficiência económica nesses sistemas sem a necessidade de alterar as infra-estruturas dos mesmos.

O objectivo geral deste estudo é o desenvolvimento de uma programa que possa auxiliar os gestores/operadores das empresas de abastecimento de água a optimizar o funcionamento das estações elevatórias tendo em vista a minimização do custo da energia, analisando-se a variação do consumo de água solicitado ao sistema em causa, a variação temporal da tarifa eléctrica e a capacidade de regularização dos reservatórios.

Pretende-se demonstrar a possibilidade de redução do custo de energia pela implantação de medidas de fácil execução sem a necessidade de investimentos para alcançar essa racionalização, bem como a possibilidade de avaliar a poupança ou encargo de diferentes acções que possam ser tomadas sobre o sistema (por exemplo, alterar a capacidade de um reservatório).

A interface computacional proposta, foi escrita na linguagem de programação MATLAB com a finalidade de promover a integração de um módulo optimizador, e um módulo de simulação hidráulica representado pelo programa EPANET 2.0, responsável pela obtenção de dados necessários ao funcionamento do programa e simulação do resultado obtido.

Para avaliar a metodologia proposta foi tomado como modelo uma pequena parcela do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água ao Baixo Cávado e Ave, para servir de instrumento de verificação da aplicabilidade da ferramenta desenvolvida a um sistema real.

1.1 A EMPRESA

O presente estudo é o resultado da colaboração entre a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e a empresa Águas do Cávado, SA (AdC). Esta parceria permitiu assim concretizar em modelo de optimização da operação de estações elevatórias e testá-lo em parte do sistema adutor de abastecimento de água desta ultima entidade.

Figura 1 - Logótipo da empresa.

A AdC foi criada pelo Decreto-Lei nº 102/95, de 19 de Maio, com início de actividade em Junho do mesmo ano, tendo por objecto exclusivo a exploração e gestão do Sistema Multimunicipal de captação, tratamento e adução de água aos Municípios de Barcelos, Esposende, Maia (Norte), Póvoa de Varzim, Santo Tirso, Trofa, Vila do Conde e Vila Nova de Famalicão, com uma cobertura global e actual de 600 mil habitantes.

A AdC tem como missão gerir o sistema de captação, tratamento e abastecimento, garantindo o fornecimento de água potável à população servida na quantidade necessária respeitando os parâmetros de qualidade e promovendo o seu desenvolvimento sócio-económico.

A água captada no Rio Cávado é sujeita a tratamento na Estação de Tratamento de Areias de Vilar, e percorre uma rede de 252 km de condutas adutoras que abastecem 4 reservatórios de regularização, 54 reservatórios de entrega aos Municípios integrantes e 18 estações elevatórias, para além de outras infraestruturas complementares. Todo o investimento foi dimensionado de modo a satisfazer as necessidades de água potável para uma população equivalente de 900 000 habitantes no ano horizonte de 2024.

Na Figura 2 está representada a constituição actual do Sistema Multimunicipal.
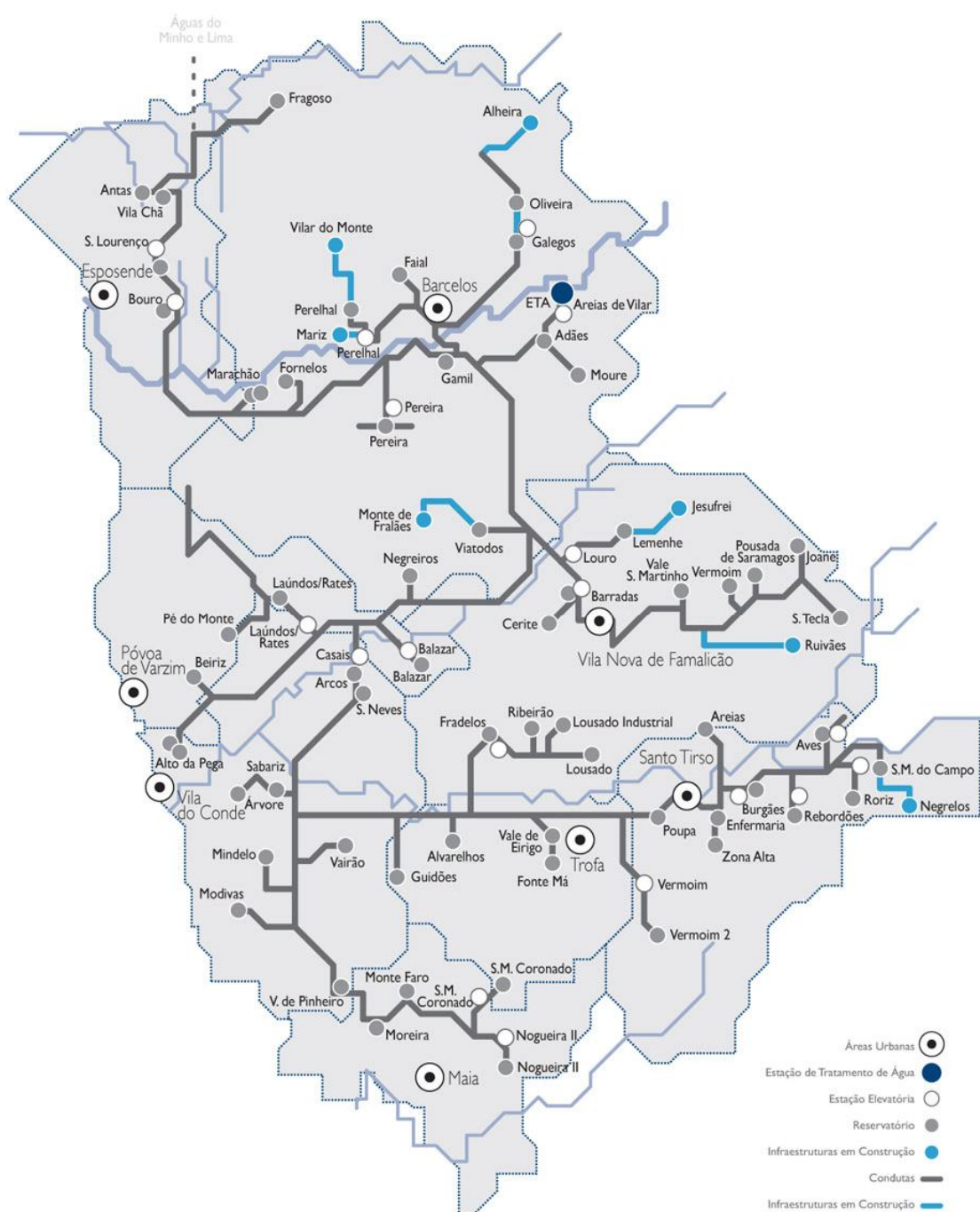
Figura 2 - Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água ao Baixo Cávado e Ave.

2

OPERAÇÃO DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

2.1. REVISÃO DA LITERATURA

As estações elevatórias são os elementos dos sistemas adutores de água que consomem mais energia podendo representar até 90 % do custo total de energia eléctrica da empresa. As recentes crises energéticas e a necessidade de contenção de despesas de operação levam a uma preocupação com a redução do custo da energia eléctrica nesses sistemas, tornando-se por isso, imprescindível a optimização do funcionamento das estações elevatórias, para evitar que politicas operacionais inadequadas prejudiquem os resultados financeiros das empresas ou o custo final da água.

Segundo López-Ibáñez *et al.* (2005), o elevado número de elementos passíveis de terem o seu estado alterado em cada hora torna complexa a tarefa dos operadores desses sistemas em definir, num determinado instante, qual a melhor combinação do estado operacional das bombas, de forma a tornar o sistema mais eficiente economicamente.

O principal objectivo da gestão da operação das estações elevatórias é programar a operação de N bombas durante um período de tempo, normalmente de 24 horas, de modo a satisfazer restrições do sistema e condições limite, enquanto o custo operacional é minimizado. Os principais custos associados à operação de estações elevatórias são os custos com energia eléctrica e os de manutenção.

O custo com a electricidade é composto pelo custo de energia activa (€/kWh), i.e., o custo da energia consumida em determinado período tarifário de entrega de energia eléctrica, e o custo de potência contratada (€/kW), i.e., o custo associado à potência que o distribuidor coloca em termos contratuais à disposição do cliente. O custo da energia activa geralmente varia consoante o período do dia, com horas de ponta, em que o custo da electricidade é mais elevado, e outros períodos onde o custo é menor. Em relação aos custos de manutenção, estes não podem ser facilmente estimados. Contudo, o

desgaste das bombas é causado principalmente pelos frequentes accionamentos das mesmas. Por este motivo, se se minimizar o número de arranques e paragens das bombas minimiza-se também os custos de manutenção.

Os requisitos e componentes básicos de um ambiente óptimo de controlo para EE's de abastecimento de água foram apresentados e discutidos por Goldman *et al.* (2000). Os componentes do modelo incluem modelos hidráulicos da rede, modelos de previsão de consumo e modelos óptimos de controlo. As metodologias estudadas estão classificadas em:

- tipo de sistema a que essa metodologia pode ser aplicada (1 fonte - 1 reservatório ou múltiplas fontes - múltiplos reservatórios);
- tipo de modelo hidráulico utilizado (balanço de massa, regressão ou simulação hidráulica);
- tipo de modelo de previsão de consumo utilizado (distribuído ou proporcional);
- tipo de método de optimização utilizado (programação linear, programação dinâmica ou programação não linear);
- e pela natureza da política de controlo (implícita ou explícita).

Ormsbee and Lansey (1994) fizeram uma revisão dos métodos utilizados na optimização da operação de estações elevatórias de sistemas de abastecimento de água para minimizar os custos operacionais. Desenvolveram algoritmos genéticos multiobjectivo para a atingir a política operacional óptima para as EE's. O problema foi formulado como de optimização do custo que procura minimizar os custos marginais de fornecimento de água, enquanto cumpre as restrições físicas e hidráulicas do sistema (por exemplo, manter água suficiente nos reservatórios para atender aos consumos variáveis com o tempo). Para atingir esse objectivo criaram um algoritmo para determinar qual das bombas disponíveis dentro do sistema, deve ser utilizada durante cada intervalo do período de optimização.

Ostfeld and Shamir (1993) desenvolveram um modelo de optimização que optimiza os custos com a bombagem e a qualidade da água usando condições em estado estacionário e dinâmicas utilizando GAMS/MINOS (*General Algebraic Modeling System; Mathematical In-Core Nonlinear Optimization Systems*). O objectivo era o de minimizar o custo total, incluindo os custos da água na fonte, de tratamento e da energia para operar o sistema. As restrições incluíam equações que descrevem a mudança de caudal e qualidade ao longo do sistema, leis físicas de escoamento e concentração e os requerimentos de nível do serviço prestado.

A utilização de programação linear na optimização deste tipo de sistemas foi abordada a fundo por Jowitt e Germanopoulos (1992) no seu estudo focado na política operacional óptima em redes de distribuição de água. O seu trabalho apresenta um método baseado em programação linear para determinar uma política operacional óptima (custo mínimo) das estações elevatórias para um período de 24h. O método provou ser robusto e com baixo requerimento de tempo de resolução, e por isso apto para implementação em tempo real.

Uma outra abordagem ao assunto é a programação dinâmica (PD) e foi usada para a optimização deste tipo de problemas por Coulbeck and Orr (1982) e Coulbeck *et al.* (1987). Este método é sensível ao

número de reservatórios e à quantidade de bombas existentes. Este método tem aplicação restrita a sistemas de pequenas dimensões.

Com o propósito de gerar uma regra geral para a operação de EE's em tempo real, Nitivattanamon *et al.* (1996) propuseram um modelo de optimização progressiva, que dividia, no tempo e no espaço, o sistema em vários sub-sistemas planeando intervalos dentro dos vários períodos operacionais. O modelo foi aplicado ao sistema adutor da cidade de Pittsburgh tendo a solução óptima apresentado uma redução de 20 % nos custos operacionais das EE's, quando comparados com os custos reais.

Ko *et al.* (1997) utilizaram uma técnica de análise multiobjectivo para determinar a operação óptima de EE's e reservatórios, definindo três objectivos distintos: minimização dos custos de energia eléctrica na EE, estabilidade na operação das bombas e confiança no atendimento dos consumos que variam aleatoriamente. Foi utilizado um algoritmo de programação dinâmica para encontrar a solução óptima, tendo sido depois aplicada a metodologia ao sistema de distribuição de água da cidade de Kumi (Coreia do Sul). Segundo os autores os resultados da optimização indicaram um potencial melhoramento da operação do sistema quando comparada às operações históricas.

2.2. ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉCTRICA

Segundo Tsutiya (2001) existem várias acções para reduzir o custo com a energia eléctrica que poderão ser implementadas considerando as características particulares de cada sistema. Estas acções podem agrupar-se em três grandes grupos:

- Redução do Custo sem Redução do Consumo de Energia Eléctrica
  - Reduções do custo sem investimento (acções administrativas) – são situações que não necessitam de investimento em novas instalações ou equipamentos. Exemplos destas medidas são: a alteração da potência contratada e alteração dos tarifários. Devido à sua simplicidade, esta é das medidas mais utilizadas.
  - Redução do Custo com investimento (acções operacionais) – depende de recursos investidos em equipamentos e instalações, após a realização de pequenos estudos. Enquadram-se aqui: correcção do factor de potência, alteração da tensão de alimentação (passar de baixa para alta tensão, por exemplo) e melhoria do factor de carga. Como se trata de investimentos não muito elevados, são também bastante utilizados para a redução de custos.

- Redução do Custo pela Diminuição do Consumo de Energia Eléctrica
  - Redução da altura manométrica – a altura manométrica é composta pela altura geométrica e pelas perdas de carga. Desde que o sistema esteja bem projectado, dificilmente se consegue qualquer diminuição na altura geométrica, pelo que se torna necessário a redução das perdas de carga através de: escolha adequada do diâmetro económico; limpeza ou revestimento das tubagens; eliminação de ar nas tubagens; e correcta disposição das tubagens.
  - Redução do volume de água bombeada – esta medida está directamente ligada à redução dos custos de electricidade pois a potência do grupo elevatório será menor. Embora se possam considerar diversos factores para a diminuição do volume de água, os mais importantes são o

controlo de perdas de água e as modificações nas características dos componentes das instalações hidráulicas.
  - Melhoria de rendimento dos grupos elevatórios – os motores eléctricos e as bombas são os principais consumidores de energia eléctrica pelo que se torna necessária uma melhoria nos seus rendimentos.

- Redução do Custo pela Alteração do Sistema Operacional
  - Accionar as bombas fora dos períodos em que a electricidade é mais cara, garantindo que as necessidades de água são cumpridas.
  - Utilização de variadores de frequência nos conjuntos electro-bomba - num sistema de abastecimento torna-se necessário controlar o volume bombeado em função do consumo.

Neste trabalho procura-se desenvolver uma metodologia de diminuição do custo de energia eléctrica apenas com alteração do planeamento operacional das EE's, sem necessidade de investimentos em novas instalações ou equipamentos.

2.3. TARIFA DA ENERGIA ELÉCTRICA

Segundo o Tarifário de Venda de Energia Eléctrica a Clientes Finais (2009) do Grupo Energias de Portugal, publicado no Despacho nº 22/2008, da Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos e, de acordo com o artº 26 do mesmo regulamento, os períodos tarifários existentes são:

- Período I – de 1 de Janeiro a 31 de Março
- Período II – de 1 de Abril a 30 de Junho
- Período III – de 1 de Julho a 30 de Setembro
- Período IV – de 1 de Outubro a 31 de Dezembro

Estes 4 períodos são reduzidos a dois conforme o período de hora legal em que se enquadram. Sendo assim os períodos II e III formam o período de hora legal de Verão e, os períodos I e IV o período de hora legal de Inverno.

Cada dia é dividido em quatro períodos horários nos quais são associados diferentes preços. Esses períodos são definidos pela ERSE, conforme referido anteriormente e estão expostos nas Figura 3 e Figura 4, no que diz respeito aos dias úteis.
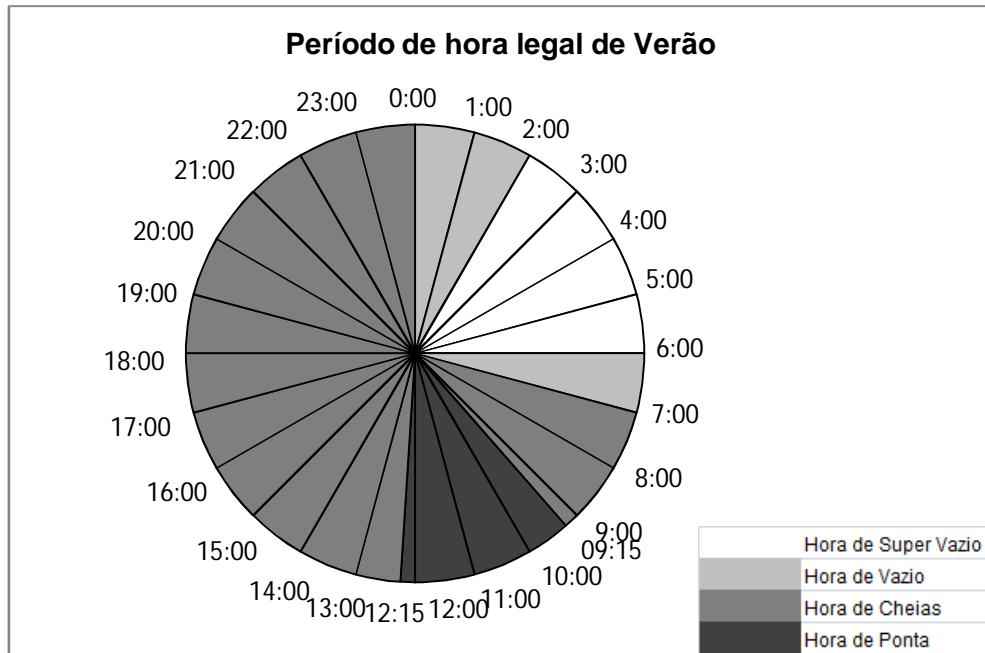
Figura 3. Períodos horários de entrega de energia eléctrica a clientes finais para o período de hora legal de Verão para um dia útil (ERSE, 2008).
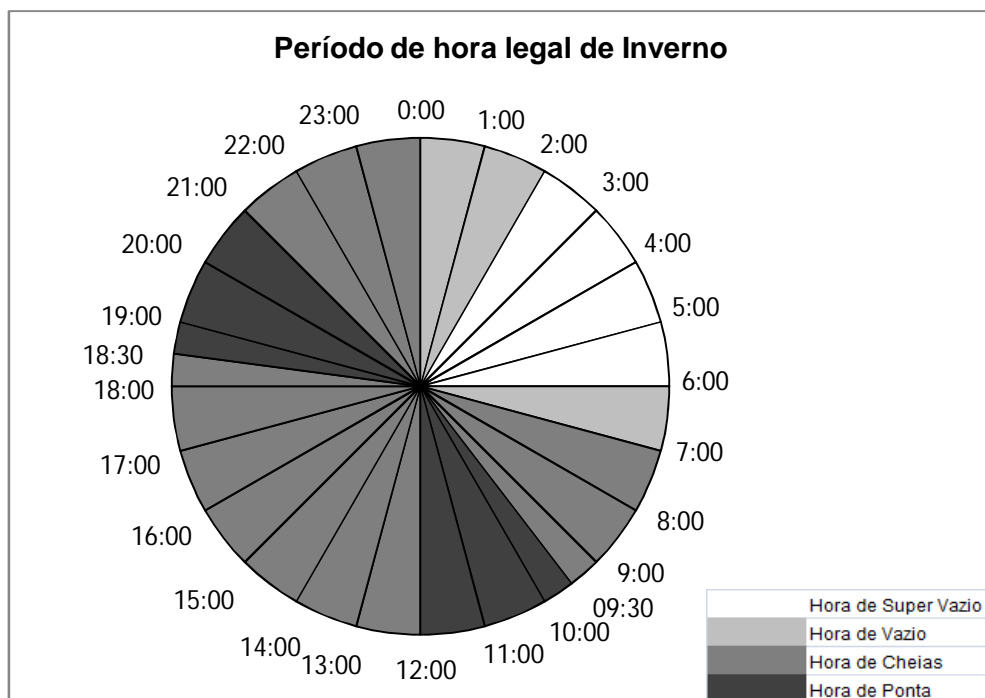
Figura 4. Períodos horários de entrega de energia eléctrica a clientes finais para o período de hora legal de Inverno para um dia útil (ERSE, 2008).

Como se pode verificar nas figuras anteriores, a principal diferença dos períodos apresentados é que para a hora legal de Inverno existem dois períodos de hora de ponta enquanto que no Verão só existe um.

Neste estudo considerou-se que os preços praticados correspondem aos valores de energia eléctrica fornecida em alta tensão para tarifas de longas utilizações pois é o que se passa no sistema estudado. Os preços da energia aplicados em cada período, em euros por quilowatt hora (€/kWh), estão representados na Tabela 1.

Tabela 1. Preços, em €/kWh, da energia eléctrica fornecida em alta tensão para tarifas de longas utilizações (ERSE, 2008).

	Período de Inverno	Período de Verão
Horas de ponta	0,0820	0,0821
Horas cheias	0,0636	0,0660
Horas de vazio normal	0,0424	0,0449
Horas de super vazio	0,0396	0,0419

Neste estudo, dividiu-se o dia em períodos de tarifa eléctrica como exposto na Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2. Períodos de tarifa de electricidade considerados para o período de hora legal de Verão

Período	Hora inicial	Hora final	Preço (€/kWh)
1	00:00	02:00	0,0449
2	02:00	06:00	0,0419
3	06:00	07:00	0,0449
4	07:00	09:00	0,0660
5	09:00	12:00	0,0821
6	12:00	24:00	0,0660

Tabela 3. Períodos de tarifa de electricidade considerados para o período de hora legal de Inverno

Período	Hora inicial	Hora final	Preço (€/kWh)
1	00:00	02:00	0,0424
2	02:00	06:00	0,0396
3	06:00	07:00	0,0424
4	07:00	09:00	0,0636
5	09:00	12:00	0,0820
6	12:00	18:00	0,0636
7	18:00	21:00	0,0820
8	21:00	24:00	0,0636

2.4. CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DA ÁGUAS DO CÁVADO, S.A.

De um modo geral, as empresas de abastecimento de água consomem mensalmente importantes recursos energéticos na operação dos seus sistemas.

Em 2007, a empresa AdC possuía em funcionamento 60 instalações consumidoras de energia eléctrica com, aproximadamente, uma potência total instalada de 15 768 MVA, o que gerou um consumo global de 26 840 846 kWh, resultando numa factura de 1 477 997 €. A maior parte da energia consumida provém sobretudo da ETA de Areias de Vilar e das Estações Elevatórias.

Na Figura 5 pode observar-se a distribuição dos consumos de energia eléctrica no ano de 2007, sendo claramente evidente a existência de 6 instalações, responsáveis pelo consumo de 97% da energia eléctrica.
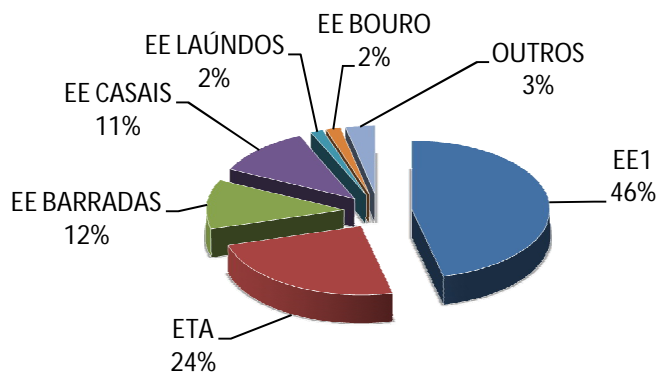
Figura 5. Distribuição percentual do consumo anual de energia eléctrica nas Águas do Cávado, SA, no ano de 2007.

Nesse mesmo ano a despesa total com a factura eléctrica dessas 6 instalações correspondeu a aproximadamente 94% da despesa total da energia eléctrica da empresa, conforme se pode verificar na Figura 6. Sendo as estações elevatórias responsáveis por cerca de 73 % dessa factura.
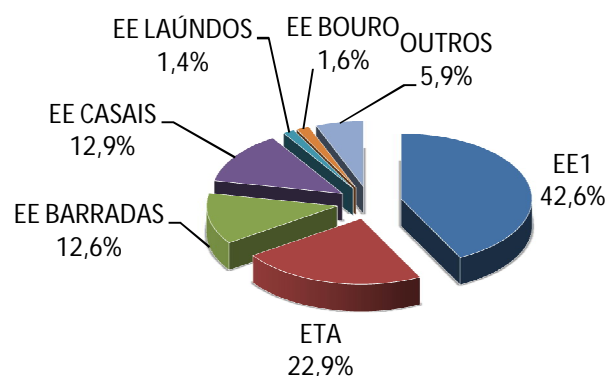
Figura 6. Distribuição percentual do custo anual com energia eléctrica nas Águas do Cávado, SA, no ano de 2007.

Existe actualmente na empresa um plano de gestão de energia eléctrica formalizado, definido pelo gestor de energia eléctrica ou por um chefe de departamento. O gestor de energia responde perante o chefe de departamento responsável pela energia eléctrica. Há uma monitorização mensal do consumo e do custo com base nas facturas de energia eléctrica. É estabelecida uma meta global, no sentido de diminuir o consumo e contabiliza-se a poupança anual. No que diz respeito à energia eléctrica, é feita uma revisão periódica do melhor tarifário por instalação, sendo esta realizada internamente. No que diz respeito à compra de energia, existe a preocupação de contratar sempre o melhor fornecedor de energia, sempre que haja condições de mercado. O orçamento é baseado no custo por unidade de previsão de consumo para o ano seguinte. O investimento em eficiência é realizado com os mesmos critérios de rentabilidade de todos os outros investimentos.

3

FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS NO DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

Para a construção do algoritmo proposto neste trabalho, utilizaram-se dois *softwares*: o MATLAB e o EPANET 2.0. Neste capítulo estão expostas as principais características dos dois programas.

3.1 EPANET 2.0

Para que o programa criado seja viável, é necessário utilizar uma ferramenta que recolha algumas informações necessárias ao funcionamento do algoritmo desenvolvido, tais como padrões consumos, número de componentes a analisar, características dos componentes da rede, etc. É também importante simular o resultado obtido através da optimização. O simulador hidráulico mais utilizado em todo o mundo é o EPANET2, criado por Rossman (2000) para modelar o comportamento das redes hidráulicas em regime de escoamento permanente. É um programa de domínio público (freeware) podendo ser manipulado pelo utilizador para adequação a aplicações específicas.

Para um conhecimento mais aprofundado do programa recomenda-se a consulta do “MANUAL DO UTILIZADOR EPANET 2.0” da autoria de Lewis A. Rossman da United States Environmental Protection Agency e traduzido para português pelo Núcleo de Engenharia Sanitária do Departamento de Hidráulica e Ambiente do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Este capítulo foi desenvolvido com base no documento referido, procurando-se expor ao leitor as funcionalidades do programa.

O EPANET 2.0 é um programa desenvolvido pela U. S. Environmental Protection Agency (EPA) para estudar o comportamento hidráulico e a qualidade da água em redes de distribuição de água em regime permanente. Devido à sua versatilidade, pode ser aplicado em diferentes tipos de aplicações hidráulicas tais como simulação e calibração de redes.

As vantagens de utilizar este simulador são as seguintes:

- É distribuído de forma gratuita nas versões inglesa, espanhola e portuguesa, esta última traduzida pelo LNEC;
- Acesso a uma Toolbox formada por uma colecção de mais de 50 funções de programação destinada ao desenvolvimento de interfaces computacionais que incorporem o EPANET 2.0 noutros modelos específicos, como por exemplo, o modelo utilizado neste trabalho;
- É um programa amplamente testado e aceite pela comunidade científica;
- Facilidade de modelação e qualidade gráfica dos resultados. A introdução dos elementos de uma rede é bastante simples;

3.1.1 Descrição do EPANET 2.0

O EPANET é uma ferramenta que permite executar simulações dinâmicas e estáticas do comportamento hidráulico e de qualidade da água de sistemas de distribuição de água.

Uma rede é constituída por tubagens, bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e/ou reservatórios de nível variável. O EPANET permite obter os valores do caudal em cada tubagem, da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável e da concentração de espécies químicas através da rede durante o período de simulação.

O EPANET foi concebido para ser uma ferramenta de apoio à análise de sistemas de distribuição, podendo ser utilizado em diversas situações onde seja necessário efectuar simulações de sistemas, como por exemplo:

- estabelecimento de cenários de projecto;
- calibração de modelos hidráulicos;
- análise do decaimento do cloro residual;
- avaliação de consumos.

O programa pode ainda ajudar e analisar estratégias alternativas de gestão, por forma a melhorar a qualidade da água no sistema, através de, por exemplo:

- alterações na utilização da origem de água num sistema com múltiplas origens;
- alteração do esquema de funcionamento de grupos elevatórios e enchimento/vazamento de reservatórios de nível variável;
- utilização de tratamento adicional, como seja a recloragem;
- selecção de tubagens para limpeza e substituição.

Em ambiente Windows, o EPANET fornece um ambiente integrado para editar dados de entrada da rede, executar simulações hidráulicas e de qualidade da água e visualizar os resultados em vários formatos – Rossman (2000).

3.1.2 Capacidades de Modelação Hidráulica

Uma rede completamente caracterizada e uma modelação hidráulica fiável constituem pré-requisitos essenciais para a correcta modelação de um sistema. O EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, de que se destacam como principais características:

- dimensão (número de componentes) ilimitada da rede a analisar;
- cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;
- consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamentos, etc;
- modelação de bombas de velocidade constante ou variável;
- cálculo da energia de bombeamento e do respectivo custo;
- modelação dos principais tipos de válvulas;
- modelação de reservatórios de nível variável através de curvas de volume em função da altura de água;
- múltiplas categorias de consumos nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação temporal;
- modelação da relação entre pressão e caudal efluente de dispositivos emissores;
- possibilidade de basear as condições de operação do sistema em controlos simples, dependentes de uma só condição, ou em controlos com condições múltiplas.

3.1.3 Passos a Seguir na Utilização do EPANET

A modelação de um sistema de distribuição de água através do EPANET utiliza tipicamente os seguintes passos:

a) desenhar uma representação esquemática do sistema de distribuição ou importar uma descrição-base do sistema a partir de um ficheiro de texto;
b) editar as propriedades dos objectos que constituem o sistema;
c) descrever as condições de operacionalidade do sistema;
d) seleccionar um conjunto de opções de simulação;
e) executar uma simulação hidráulica ou de qualidade da água;
f) visualizar os resultados da simulação.

3.1.4 Componentes físicos da rede

O EPANET modela um sistema de distribuição de água como sendo um conjunto de troços ligados a nós. Os troços representam as tubagens, bombas e válvulas de controlo. Os nós representam junções, reservatórios de nível fixo (RNF) e reservatórios de nível variável (RNV). A Figura 7 ilustra o modo como estes objectos se podem ligar entre si, por forma a constituir uma rede. (LNEC, 2004)
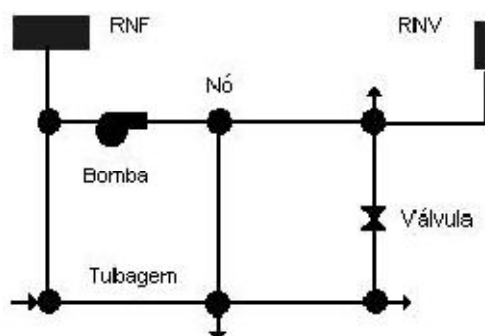
Figura 7. Componentes Físicos de um Sistema de Distribuição de Água (LNEC, 2004).

Na rede adutora estudada estão presentes os componentes descritos abaixo, acompanhados pela sua definição.

3.1.4.1 Reservatórios

Os reservatórios de nível fixo (RNF) têm um volume de armazenamento de água de capacidade ilimitada e carga hidráulica constante. Constituem origens ou sumidouros de água externos à rede. São utilizados para simular lagos, rios, aquíferos ou ligações a outros sistemas. Podem também servir como pontos de origem de qualidade da água. Os principais parâmetros a inserir nas propriedades são o nível de água e, caso seja necessário, a qualidade inicial para simulações de qualidade da água.

Os reservatórios de nível variável (RNV) possuem uma capacidade de armazenamento limitada, podendo o volume de água variar ao longo da simulação. São definidos pelas seguintes propriedades: cota do fundo (altura da água é zero), diâmetro, altura de água mínima, altura de água máxima, altura de água inicial para o cenário a simular e qualidade da água inicial. Os principais resultados da simulação ao longo do tempo são: carga hidráulica (nível da água) e a qualidade da água.

3.1.4.2 Tubagens

São troços que transportam água entre os vários pontos da rede. O EPANET considera que o escoamento ocorre sempre em pressão em todas as tubagens ao longo da simulação. O escoamento ocorre dos pontos com carga hidráulica mais elevada para os pontos com carga hidráulica mais baixa. Os principais parâmetros a inserir nas propriedades são: nó inicial e final, diâmetro, comprimento, coeficiente de rugosidade, estado (aberto, fechado ou com válvula de retenção). As grandezas obtidas em resultado da simulação são: caudal, velocidade, perda de carga, factor de resistência ou factor de Darcy Weisbach.

3.1.4.3 Bombas

São troços de rede que transferem energia para o escoamento aumentando a carga hidráulica. Os principais dados a inserir no programa são: nó inicial e final e a curva característica da bomba. Como dados de saída temos: o caudal bombeado e a altura de elevação. As bombas podem ser ligadas ou desligadas em determinado períodos de tempo ou quando ocorrem determinadas condições de operação na rede. O EPANET também pode determinar o consumo de energia e o custo de bombeamento. A cada bomba pode ser associada uma curva de rendimento do grupo electrobomba e uma tabela de preços de energia.

3.1.4.4 Nós

São pontos da rede onde os troços ligam entre si e onde a água entra e sai da rede. Os principais dados de entrada são: cota acima de determinado nível de referência, consumo e qualidade inicial da água. Em cada instante da simulação, os resultados obtidos são: carga hidráulica total, pressão e qualidade da água. Os nós podem ainda apresentar as seguintes características: consumo variável no tempo, múltiplas categorias de consumo associadas, ter consumos negativos (indicando que há entrada de água na rede), constituir origens de qualidade da água e conter dispositivos emissores do tipo orifício.

3.1.4.5 Válvulas

São troços que limitam a pressão ou o caudal num ponto particular da rede. Os principais dados a introduzir são: nós inicial e final, diâmetro, parâmetro de controlo na válvula e estado. Os principais resultados obtidos são o caudal e a perda de carga. Os principais tipos de válvula existentes no programa são; válvula de controlo da pressão a jusante ou válvula redutora de pressão (VRP), válvula de controlo da pressão a montante ou válvula de alívio (VA), válvula de perda de carga fixa (VPCF) e válvula reguladora de caudal (VRC).

3.1.5 COMPONENTES NÃO-FÍSICOS DA REDE

Adicionalmente aos componentes físicos, o EPANET permite definir categorias de informação sobre a rede: curvas, padrões e controlos, que descrevem o comportamento e os aspectos operacionais de um sistema de distribuição de água.

3.1.5.1 Curvas

As curvas contêm pares de dados que representam uma relação entre duas grandezas. Dois ou mais componentes podem partilhar a mesma curva. O EPANET permite utilizar os seguintes tipos de curvas:

- Curva Característica da Bomba (CCB)
- Curva de Rendimento da Bombas (CRB)
- Curva de Volume
- Curva de Perda de Carga

A. Curva Característica da Bomba

A CCB representa uma relação entre a altura de elevação e o caudal, definindo as condições de funcionamento. A altura de elevação representa a energia fornecida ao escoamento pela bomba e é representada no eixo das ordenadas, em metros. O caudal é representado no eixo das abcissas, nas unidades respectivas. Uma curva da bomba válida deve apresentar alturas de elevação decrescentes com o aumento do caudal (Figura 8).

O EPANET define automaticamente as curvas das bombas quando o utilizador insere os valores necessários de altura de elevação e caudal. É possível o EPANET gerar uma curva da bomba com a inserção de apenas um par de valores, devendo esse ponto corresponder ao ponto de funcionamento óptimo da bomba.
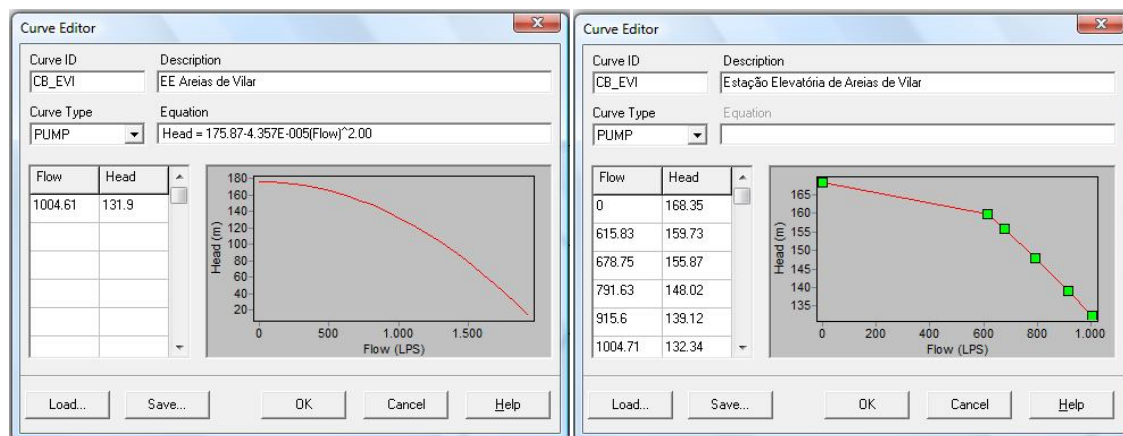
Figura 8. Exemplo de curva da bomba com um e vários pontos.

B. Curva de Rendimento da Bombas

Este tipo de curva relaciona o rendimento do grupo electrobomba (eixo das ordenadas em percentagem) com o caudal bombeado (eixo das abcissas nas unidades respectivas a esta grandeza).

A curva de rendimento é apenas utilizada para cálculos energéticos e, se não for fornecida para uma bomba específica, deve fixar-se um valor global constante para o rendimento, através do editor de Opções de Energia.

Como para a curva da bomba, também a curva de rendimento é gerada a partir de pares de valores introduzidos pelo utilizador.

Um exemplo deste tipo de curvas está exposto na Figura 9.
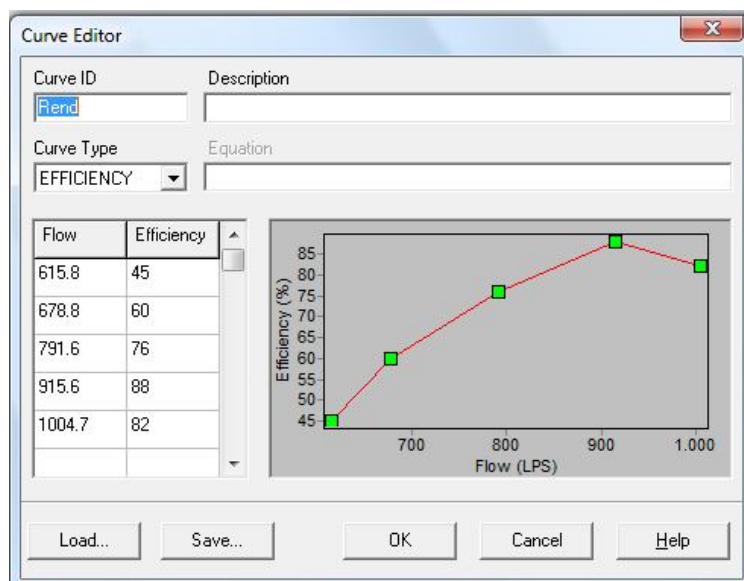
Figura 9. Exemplo de uma curva de rendimento.

C. Curva de Volume

Este tipo de curvas é utilizado quando é necessário representar com exactidão um RNV para o qual a respectiva secção varia com a altura. Relacionam o volume de água disponível no reservatório (eixo das ordenadas) com a altura de água (eixo das abcissas). As alturas de água mínima e máxima da curva de volume devem conter os valores mínimo e máximo de água para os quais o reservatório de nível variável opera.

D. Curva de Perda de Carga

São curvas que relacionam a perda de carga (eixo das ordenadas em unidades de comprimento) com o caudal (eixo das abcissas em unidades de caudal). Permitem modelar dispositivos e situações com uma relação perda de carga – caudal específica.

3.1.5.2 Padrões Temporais

Um padrão temporal é constituído por um conjunto de factores multiplicativos que podem ser aplicados ao valor de uma determinada grandeza, de forma a traduzir a sua variação no tempo. O consumo nodal, a carga hidráulica num reservatório de nível fixo, os esquemas de bombeamento e a entrada de um parâmetro de qualidade da água na rede podem estar associados a um padrão temporal.

O passo de tempo do padrão utilizado em todos os padrões assume um valor fixo. Em cada passo de tempo, o valor da grandeza mantém-se constante, igual ao produto do seu valor nominal pelo factor multiplicativo do padrão respectivo a esse passo de tempo.

Embora todos os padrões temporais tenham que utilizar o mesmo passo de tempo, cada padrão pode apresentar um número diferente de passos de tempo.

Na Figura 10 está representado um exemplo de um padrão temporal.
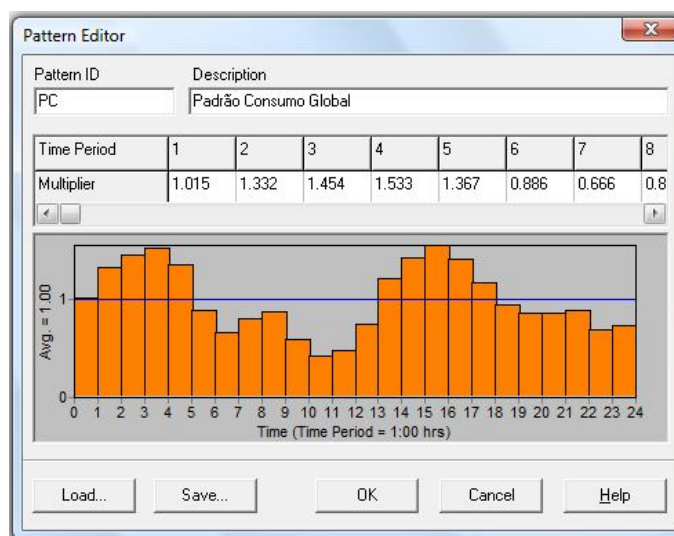
Figura 10. Exemplo de um padrão temporal.

3.1.5.3 Controlos

São um conjunto de instruções de operação da rede ao longo do tempo. Especificam o estado dos troços em função do tempo, altura de água num RNV e valores de pressão em pontos específicos da rede. Existem duas categorias de controlos:

- Controlos Simples
- Controlos com Condições Múltiplas

A. Controlos Simples

Os controlos simples alteram o estado ou as propriedades de um troço com base nos seguintes parâmetros:

- altura de água num RNV;
- pressão num nó;
- instante de simulação;
- instante do dia.

Na Figura 11 apresentam-se alguns exemplos de controlos simples.

Não existe limite para o número de controlos simples utilizados.

Instruções de controlo	*Significado*
LINK 12 CLOSED IF NODE 23 ABOVE 6	(Fechar o Troço 12 se a altura no RNV 23 exceder 6 m)
LINK 12 OPEN IF NODE 130 BELOW 30	(Abrir o Troço 12 se a pressão no Nó 130 for inferior a 30 m)
LINK 12 1.5 AT TIME 16	(Ajustar a regulação de velocidade da bomba 12 para 1.5 às 16 horas de simulação)
LINK 12 CLOSED AT CLOCKTIME 10 AM LINK 12 OPEN AT CLOCKTIME 8 PM	(O Troço 12 é repetidamente fechado às 10 AM e aberto às 8 PM ao longo da simulação)

Figura 11. Exemplo de controlos simples (Rossman, 2000).

B. Controlos com Condições Múltiplas

Os Controlos com Condições Múltiplas permitem que o estado e as propriedades de troços dependam da combinação de um conjunto de condições estabelecidas pelo utilizador. Essas condições podem ocorrer na rede, após o cálculo das condições hidráulicas iniciais.

Na Figura 12 e Figura 13estão expostos exemplos deste tipo de controlos.
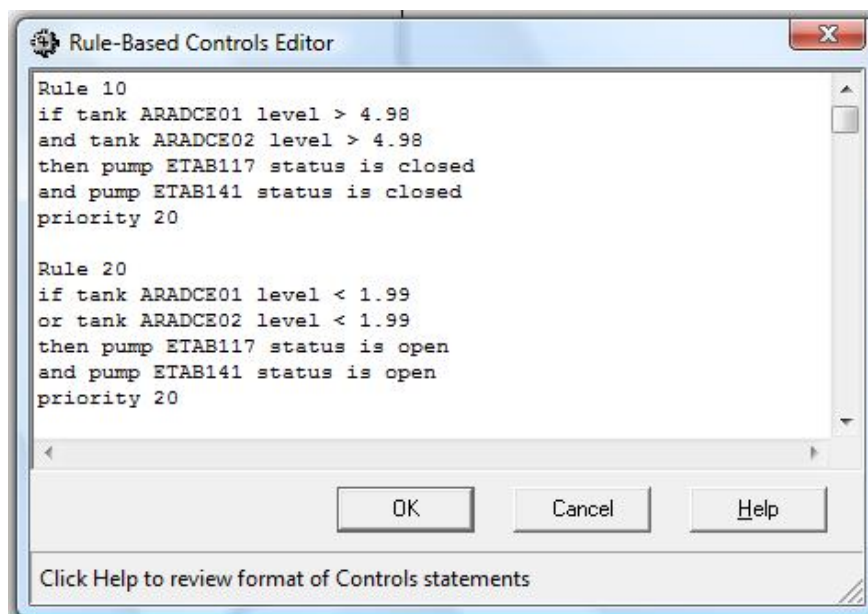
Figura 12. Exemplo de controlos com condições múltiplas.

No exemplo acima exposto, Figura 12, o utilizador define regras que alteram o estado das bombas consoante o nível de água nos RNV's. As bombas são accionadas quando o nível de água nos RNV's é inferior a 1,99 m e desligadas quando a água atinge níveis superiores a 4,98 m.
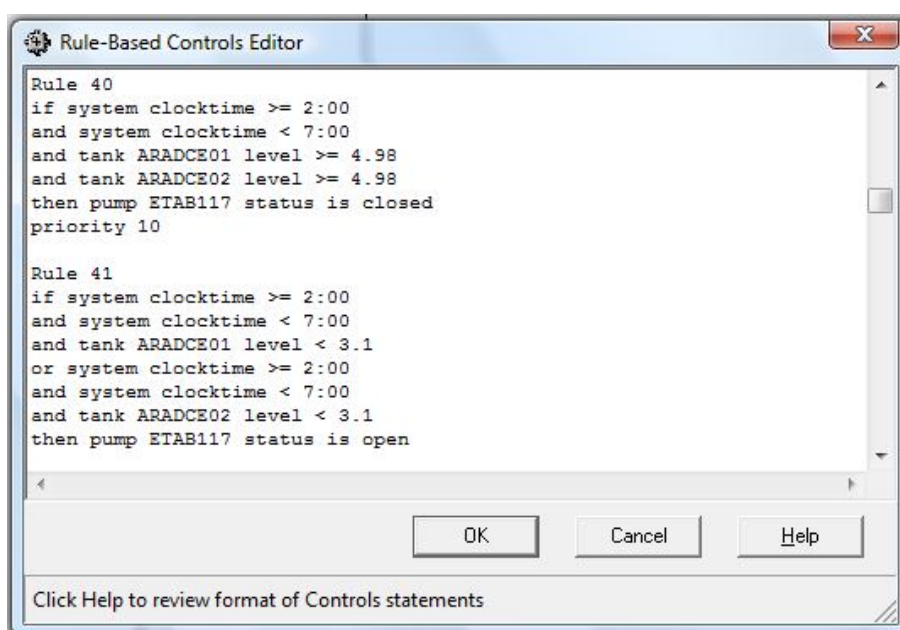
Figura 13. Exemplo de controlos com condições múltiplas.

As regras ilustradas na Figura 13 definem o estado das bombas consoante o período do dia e o nível da água nos RNV's.

3.2 MATLAB

O Matlab (Matrix Laboratory) é um programa de computador de uso específico para executar cálculos científicos e de engenharia. Inicialmente foi criado como um programa para operações matemáticas sobre matrizes, mas ao longo dos anos transformou-se num sistema computacional flexível capaz de resolver essencialmente qualquer problema técnico. O programa Matlab utiliza uma linguagem específica, similar a outras linguagens de programação, e oferece uma ampla biblioteca de funções predefinidas para que a programação técnica se torne mais fácil e eficiente.

Na construção do algoritmo desenvolvido utilizaram-se essencialmente ciclos *for, while e if* e comandos para leitura de ficheiros de texto e uma função de optimização que está integrada na biblioteca do Matlab.

O programa Matlab possui rotinas pré-programadas para optimizar funções com restrições. Este pacote de optimização tem diversos algoritmos apropriados para diferentes casos.

3.2.1 FUNÇÃO DE OPTIMIZAÇÃO UTILIZADA

A função utilizada para optimizar a função objectivo proposta foi a ***fmincon*** que dada uma aproximação inicial, x_0, ela procura a solução do problema, isto é, um ponto que minimiza f(x) e que verifica todas as restrições, usando o método da programação quadrática sequencial, baseado numa aproximação Quasi-Newton da Hessiana da Lagrangeana, com procura unidimensional.

Esta função encontra uma solução que minimiza um problema especificado da seguinte forma:

$$\min_x f(x) \;\; sujeito\ a \begin{cases} c(x) \leq 0 & \text{(restrições não lineares de desigualdade)} \\ ceq(x) = 0 & \text{(restrições não lineares de igualdade)} \\ A \cdot x \leq b & \text{(restrições lineares de desigualdade)} \\ Aeq \cdot x = beq & \text{(restrições lineares de igualdade)} \\ lb \leq x \leq ub & \text{(limites simples das variáveis)} \end{cases}$$

Em que *x*, *b*, *beq*, *lb* e *ub* são vectores, *A* e *Aeq* são matrizes, *c(x)* e *ceq(x)* são funções cujo resultado são vectores e *f(x)* é uma função que devolve um escalar. *f(x)*, *c(x)* e *ceq (x)* podem ser funções não lineares.

A sintaxe utilizada para chamar a função é a seguinte:

[x,fval,exitflag,output,lambda,grad,hessian] = fmincon(fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options).

Para definir as opções desta função recorre-se a:

options = optimset('param1',value1,'param2',value2,...)

em que se podem definir vários parâmetro tais como: número máximo de iterações, algoritmo utilizado, etc.

Neste caso concreto a chamada da função objectivo é realizada da seguinte forma:

```
options_1 = optimset('LargeScale','off','Algorithm','active-set', 'Diagnostics','on','Display','iter',…
                    'DiffMaxChange',1.0e-02, 'DiffMinChange',1.0e-05, MaxIter', 1000,…
                    'MaxFunEvals',10000, 'TolFun',1.0e-6,'TolCon',1.0e-6, 'TolConSQP',…
                    1.0e-6,'TolX',1e-6);

  value_TolX = optimget (options_1,'TolX');
  value_TolFun = optimget (options_1,'TolFun');
  value_TolCon = optimget (options_1,'TolCon');
  value_TolConSQP = optimget (options_1,'TolConSQP');

  [V_elev_acum,f_objectivo,exitflag,output,lambda,grad,hessian] = ...
    fmincon(@F1_obj_ee_vfinal_2,V_elev_acum_i,[],[],A_eq,b_eq,lb,ub,[],options_1);
```

Na elaboração deste programa, não existem restrições não lineares nem restrições lineares de desigualdade pelo que no local reservado a esses dados se coloca [].

A função objectivo tem de ser escrita num *M-file* diferente do que contém o programa principal na forma:

```
function [f_objectivo] = nome(x)
        .
        .
        .

f_objectivo=…;

end
```

4

DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE OPTIMIZAÇÃO

O problema abordado neste trabalho utiliza um módulo de optimização auxiliado por um modelo de simulação hidráulica, para optimizar uma função objectivo de natureza não linear com restrições, para encontrar a melhor política operacional a ser aplicada a um sistema adutor concreto, conhecido o consumo de água e o tarifário de energia.

Hidraulicamente, após o reservatório de distribuição, só se considera a variação do consumo de água ao longo do tempo, concentrado num nó da rede. Como se trata de um estudo sobre um sistema físico a funcionar regularmente, é suposto que as condições de pressão mínima e máxima na rede de distribuição são satisfeitas para qualquer nível de água no reservatório.

O elevado número de parâmetros que intervêm no processo de decisão da melhor política operacional, torna a sua análise um problema complexo, tornando-se impossível pesquisar diariamente regras que possam melhorar o desempenho do sistema sob o ponto de vista económico. Devido a isso, a busca da solução de menor custo só é possível com o auxílio de modelos computacionais formulados a partir de algoritmos matemáticos, de preferência de fácil aplicação.

Como os sistemas de abastecimento de água não podem ser tratados como laboratórios de ensaios, a simulação hidráulica torna-se um instrumento computacional bastante importante pois possibilita diagnosticar as consequências de acções a tomar no manuseamento dos componentes do sistema. O uso desses simuladores hidráulicos melhora a produtividade do trabalho e confere melhor precisão nas repostas às questões solicitadas.

A solução óptima deve ser a que minimiza os custos de operação mais importantes, ou seja, os relativos ao consumo de energia eléctrica e os de manutenção das bombas, respeitando as restrições hidráulicas, físicas e operacionais do sistema.

Neste estudo, considerou-se um horizonte de planeamento de 24 horas. O modelo matemático está moldado para representar qualquer sistema adutor composto por um reservatório de alimentação, uma estação elevatória (composta por um ou mais GE's) e um reservatório de distribuição (composto por uma ou mais células).

4.1 MODELO DE CONTROLO

O modelo de controlo utilizado é baseado no modelo proposto por Figueiredo e Martins (2007), em que o problema de optimização tem como função objectivo a minimização do custo da energia eléctrica consumida pelos GE's mantendo o mais regular possível o volume de água elevado em cada hora. As restrições a ser respeitadas neste problema são, para além das características da instalação elevatória, das leis físicas que regem o seu funcionamento, do consumo de água esperado e do custo unitário de energia eléctrica, os limites superior e inferior do volume de água armazenado no reservatório abastecido pela EE, as condições iniciais e finais do problema e o volume de água armazenado no reservatório no início e no final do período em que o custo de energia é mais elevado.

Neste estudo optou-se dividir o dia em períodos correspondentes aos períodos de tarifa de energia (capítulo 2.3), pois geralmente, na operação de sistemas de abastecimento de água, consideram-se estes períodos para definir a política operacional das bombas.

4.1.1.1 Variável de Controlo

A formulação utilizada é a indirecta, onde o volume a elevar em cada hora constitui a variável de controlo. É uma formulação mais simples de implementar do que a directa, sendo que nesta a variável de controlo (ou variáveis, dependendo do número de GE's da EE) quantifica a fracção do incremento temporal durante a qual um GE está a funcionar.

A equação de balanço aplicada ao reservatório de jusante estabelece que, para um determinado intervalo de tempo, o volume final de água no reservatório é igual ao inicial adicionado da diferença entre o volume de água elevado pela conduta e o volume entregue pelo reservatório ao consumo:

$$V_{R,final} = V_{R,inicial} + V_{elevado} - V_{consumido} \qquad (1)$$

Considerando um período de análise de 24 horas e sendo $V_{R,0}$, o volume de água no reservatório no instante inicial, o volume de água existente no reservatório no final o incremento temporal de ordem i, $V_{R,i}$, vem definido pela seguinte expressão:

$$V_{R,i} = V_{R,0} + V_{elev,i} - V_{cons,i} \quad (2)$$

O volume acumulado elevado, entre o instante inicial e o instante final do incremento temporal de ordem i, corresponde à integração em ordem ao tempo do caudal elevado entre esses instantes

$$V_{elev,i} = \int_0^{t_i} Q_{elev}(t)dt = \int_0^{t_1} Q_{elev}(t)dt + \int_{t_1}^{t_2} Q_{elev}(t)dt + \cdots + \int_{t_{i-1}}^{t_i} Q_{elev}(t)dt \quad (3)$$

Ou ainda ao somatório dos volumes $\Delta V_{elev,j}$ elevados durante os incrementos temporais compreendidos entre o instante inicial e o instante final do incremento temporal de ordem i

$$V_{elev,i} = \Delta V_{elev,1} + \Delta V_{elev,2} + \cdots + \Delta V_{elev,i} = \sum_{j=1}^{i} \Delta V_{elev,j} \quad (4)$$

A expressão (4) define a ordenada, relativa ao instante i de uma função representativa do volume total elevado desde o instante inicial do período de análise.

Atendendo ao modo como é definida, esta função (por vezes designada de "caudais integrais" ou "volumes acumulados"), sendo contínua, é constituída por sucessivos segmentos de recta cujos declives correspondem aos caudais médios em cada incremento temporal.

Retomando a expressão (4), respeitante à água entregue pela conduta elevatória ao reservatório de jusante, o volume de água elevado em cada incremento temporal (a hora), $\Delta V_{elev,j}$, constitui a variável de controlo do problema em apreço. Contudo, em benefício do desempenho do algoritmo de optimização, optou-se por tomar como variável do problema de optimização o volume acumulado no final de cada incremento temporal, $V_{elev,i}$, definido pela expressão (4). Todavia, esta diferença em relação à formulação inicialmente apresentada para a variável de controlo é mais aparente que real; de facto, para cada incremento temporal (a hora), a diferença entre os volumes acumulados final e inicial corresponde ao volume elevado durante esse incremento:

$$V_{elev,i} - V_{elev,i-1} = \Delta V_{elev,i} \quad (5)$$

A partir do resultado optimizado da variável de controlo, é calculado o volume de água que é necessário elevar para cada período de tarifário de energia:

$$V_{elev,p} = \sum_{i=1}^{horas\ período} \Delta V_{elev,i} \ , \quad p = 1, \ldots, número\ de\ períodos \quad (6)$$

4.1.1.2 A Função Objectivo

A função objectivo utilizada é definida pela soma de duas parcelas: uma que visa ter uma operação da estação elevatória tão regular quanto possível (para as 24 horas do dia), e outra respeitante ao custo da energia eléctrica (calculada para os N períodos correspondentes ao tarifário escolhido - hora legal de Verão ou Inverno). A equação (7) representa a função a optimizar.

$$F_{obj} = w_L \sum_{i=1}^{24} L_i + w_E \sum_{i=1}^{N^o períodos} E_i p_{E,i} \qquad (7)$$

Na expressão acima exposta, L_i é o comprimento do segmento de recta que representa o traçado da função de controlo no incremento temporal de ordem i; E_i é a energia consumida no incremento temporal i, e $p_{E,i}$ corresponde ao preço unitário de energia nesse incremento. Os valores de w_Le w_E são os factores de peso atribuídos a cada parcela da função objectivo. Manter constante w_L e reduzir o valor de w_E significa diminuir a importância do custo da energia na obtenção do valor da função objectivo. No limite, anular w_E significa ignorar o custo, procurando apenas a regularização da operação dos GE's. Pelo contrário, anular w_L significa considerar exclusivamente o custo da energia.

A introdução da parcela que representa a regularidade operacional tem duas vantagens:

i. Assegurar alguma regularidade na operação dos grupos elevatórios (compete ao gestor/operador da instalação elevatória o exercício de ajustar os factores w_L e w_E);
ii. Auxiliar na pesquisa do mínimo global da função objectivo, evitando que o algoritmo convirja para mínimos locais.

4.1.1.3 Restrições do Problema de Optimização

O volume de água no reservatório no final de cada incremento temporal de ordem i, $V_{R,i}$, não pode ultrapassar a capacidade máxima do reservatório nem deve ser inferior a uma capacidade mínima fixada por considerações de outra ordem (p.e., reserva de avarias). Devido a isso, a equação (2) fica sujeita às seguintes restrições de desigualdade:

$$V_{R,i} = V_{R,0} + V_{elev,i} - V_{cons,i} \leq Cap_{máxima} \quad , \ \forall\, i = 1, \dots, 24 \qquad (8)$$

$$V_{R,i} = V_{R,0} + V_{elev,i} - V_{cons,i} \geq Cap_{mínima} \quad , \ \forall\, i = 1, \dots, 24 \qquad (9)$$

Que por sua vez, dão lugar às inequações:

$$V_{R,0} + V_{elev,i} \leq Cap_{máxima} + V_{cons,i} \quad , \ \forall\, i = 1, \dots ,24 \qquad (10)$$

$$V_{R,0} + V_{elev,i} \geq Cap_{mínima} + V_{cons,i} \quad , \ \forall\, i = 1, \dots ,24 \qquad (11)$$

Estas expressões significam que a função de controlo (isto é, a função representativa do volume acumulado de água elevada, adicionada ao volume inicial de água existente no reservatório) tem que estar compreendida numa faixa limitada inferiormente pelo volume de água consumida, adicionado da capacidade mínima fixada para o reservatório, e superiormente pelo volume acumulado de água consumida, adicionado da capacidade máxima de armazenamento do reservatório.

Quando a função de controlo se encosta ao limite superior, o reservatório está totalmente cheio; quando acontece o oposto, o reservatório contém somente o volume mínimo de água estabelecido.

Além das restrições mencionadas acima, considerou-se ainda que:

- No instante imediatamente anterior ao início do período de energia mais cara (hora de ponta) o volume de água no reservatório deve ser o correspondente à capacidade máxima do mesmo;
- No instante final do período de energia mais cara, o volume de água no reservatório deve ser o correspondente à capacidade mínima.

Estas duas restrições tentam evitar o accionamento das bombas no período em que a electricidade é mais cara. Podem ser traduzidas por:

$$V_{R,0} + V_{elev,i} = Cap_{máxima} + V_{cons,i} \qquad (12)$$

$$V_{R,0} + V_{elev,i} = Cap_{mínima} + V_{cons,i} \qquad (13)$$

Sendo que i, na equação (12) corresponde à hora anterior ao início do período de energia mais cara e, na equação (13) corresponde à hora final do período de energia mais cara.

Supondo que o modelo de controlo tem como finalidade a pesquisa da melhor política operacional para um dia esperado (médio) faz sentido admitir que este dia seja sucedido por outro de características idênticas. Em termos práticos, esta hipótese obriga a que o volume de água existente no reservatório nos instantes inicial e final do período de 24 horas em estudo seja o mesmo.

4.2 FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA DE OPTIMIZAÇÃO

O programa proposto neste trabalho calcula a energia consumida por uma EE e o respectivo custo. O período de análise deverá ser de 24 horas.

A EE poderá estar equipada com vários GE's, eventualmente com distintas curvas características (CCB's) e curvas de rendimentos (CRB's). São quantificados, para cada um dos GE's, o consumo de energia, o respectivo custo, a percentagem de tempo de operação, potência média, rendimento médio, etc.

O comportamento dos reservatórios abastecidos também é observado e representado graficamente. O caudal total "produzido" e "consumido" é calculado e representado graficamente.

O programa de optimização foi desenvolvido no *software* MATLAB com recurso a uma *Toolbox* de comunicação com o EPANET desenvolvida por André Vieira (Engenheiro Civil e Mestre em Hidráulica pela FEUP) que é uma adaptação da estrutura do EPANET *Programmer's Toolkit*, na sua versão 2.00.07 de Janeiro de 2001, desenvolvido pela EPA (as funções desta Toolbox utilizadas no decurso do algoritmo, bem como as suas características, estão enumeradas no ANEXO A).

4.2.1 ETAPAS DA CONSTRUÇÃO DA REDE HIDRÁULICA

No início da execução do programa de optimização é feita a leitura da rede hidráulica construída no EPANET 2.0. Para o correcto funcionamento do programa é necessária a introdução de alguns parâmetros durante a construção da rede a simular:

- Dados gerais das tubagens: nó inicial e final, diâmetros, comprimentos e rugosidade;
- Padrão de consumo (em que o ID deve ser “P_C”) e respectivo consumo médio diário;
- Padrão de tarifa eléctrica (em que o ID deve ser “P_E”) : este parâmetro tem de existir embora os valores horários do padrão sejam posteriormente actualizados;
- Curvas características das bombas;
- Curvas de rendimento das bombas;
- Dados gerais das bombas: cada bomba deverá ter uma CCB e uma CRB associada bem como um padrão de tarifa eléctrica e o preço da energia (este parâmetro deverá ser igual a 1);
- Dados gerais dos reservatórios: diâmetro, altura de água máxima e mínima, altura de água inicial, cota;
- Dados gerais das válvulas: nó inicial e final, tipo, diâmetro e *setting*;
- Introdução de Controlos Simples da forma:

```
LINK ID_B1 OPEN IF NODE ID_RNV BELOW 0.0
LINK ID_B1 CLOSED IF NODE ID_RNV ABOVE 10.0
LINK ID_B2 OPEN IF NODE ID_RNV BELOW 0.0
LINK ID_B2 CLOSED IF NODE ID_RNV ABOVE 10.0
```

Em que ID_B1 é o identificador da bomba 1 e ID_RNV é o identificador do reservatório de nível variável. Estes controlos devem ser introduzidos para as N bombas existentes no sistema.

Na Figura 14 estão alguns exemplos dos parâmetros listados acima.
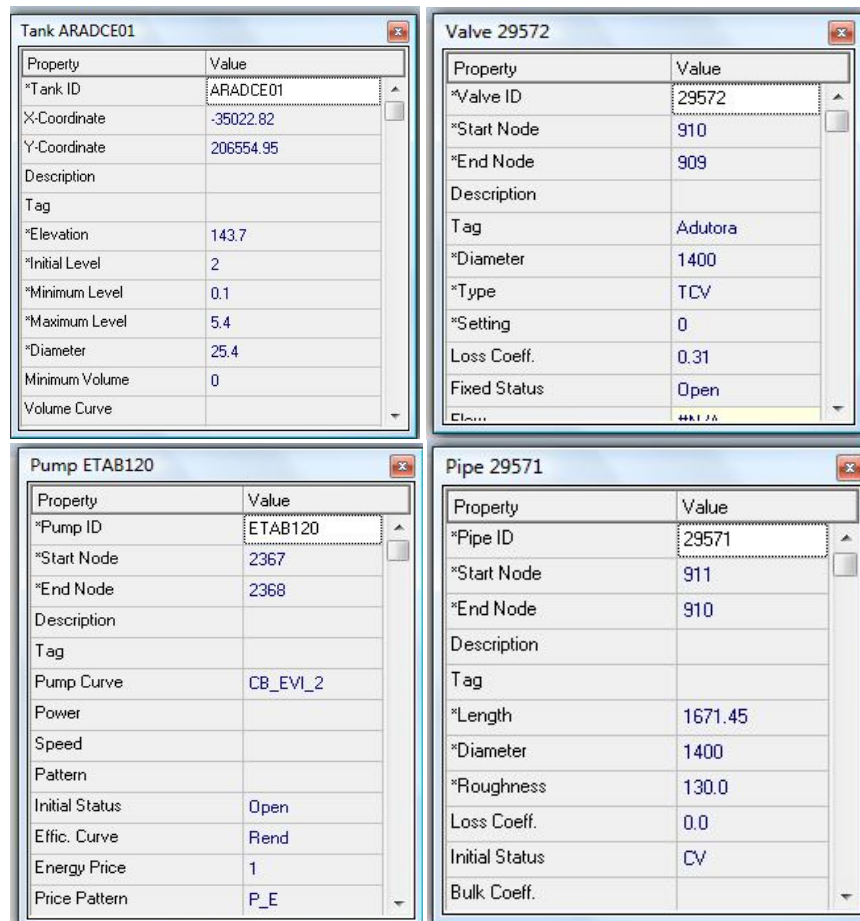
Figura 14. Exemplos de janelas de propriedades do EPANET 2.0.

4.2.2 ETAPAS DA CONSTRUÇÃO DO PROGRAMA DE OPTIMIZAÇÃO

Previamente à execução do programa criado é necessário realizar dois procedimentos:

a) Preparação do ficheiro de entrada:
exportação da rede previamente construída no EPANET, dando origem a um ficheiro do tipo "nome_problema.inp". Este passo é externo ao programa de optimização.

b) Criação dos ficheiros de texto com os tarifários de energia:

Criação de dois ficheiros de texto com as características dos tarifários de electricidade para o período de hora legal de verão e de inverno (tarifario_verao.txt e tarifario_inverno.txt). No ANEXO B encontra-se a transcrição dos ficheiros utilizados neste trabalho.

O algoritmo desenvolvido pode ser descrito pelos seguintes passos:

i. **Declaração de variáveis:**
Carregamento das variáveis globais da biblioteca de funções da *Toolbox* do EPANET (por *script*) e declaração de outras variáveis globais adicionais.

ii. **Entrada de dados e definições de ficheiros**
Introdução por parte do utilizador do ficheiro (nome_ problema) a carregar. Concatenação do nome do problema com as extensões "inp", "rep", "out" e"hyd".

iii. **Abertura da rede hidráulica**
Importação do ficheiro “nome_problema.inp”.

iv. **Verificação das unidades a utilizar na simulação**
Se o caudal não estiver em l/s termina a execução do programa.

v. **Abertura dos ficheiros 'nome_problema_inicial.inp' e 'nome_ problema_final.inp'**
Ficheiros com as configurações inicial e final da instalação a simular (geometria, consumos, padrões, etc.).

vi. **Contagem de componentes da rede a simular**
Número de nós, tubos, reservatórios, válvulas, bombas, etc.

vii. **Determinação dos *index* dos GE’s, RNV’s e nó associado ao padrão de consumo**
Os *index* são armazenados numa matriz coluna de dimensões número_componentes×1.

viii. **Contagem de padrões temporais, de curvas e de controlos simples**

ix. **Determinação e armazenagem dos *index* dos padrões de consumo e de tarifa de energia**

x. **Leitura de outras informações para controlo**
Leitura do tempo de simulação, passo de tempo da simulação hidráulica, número de passos de tempo do padrão de consumo e passo de tempo do padrão de consumo.

xi. **Cálculo dos volumes máximos e mínimos de água admissíveis nos RNV’s**
São calculados a partir da introdução por parte do utilizador das alturas máximas e mínimas de água admissíveis e do diâmetro dos RNV’s.

xii. **Introdução de regras simples de operação**
Introdução das regras que regulam o estado das bombas. É definido que quando os RNV’s atingem a altura máxima de água as bombas desligam, e quando atinge a altura mínima, ligam.

xiii. **Carregamento do tarifário de energia**

Após introdução por parte do utilizador do tarifário que quer utilizar (hora legal de inverno ou verão) são lidos os seguintes parâmetros: número de períodos, hora inicial e final de cada período e custo unitário de energia em cada período. Esses valores são registados em matrizes independentes.

xiv. Realização de uma simulação hidráulica

É realizada uma chamada do EPANET para a realização de uma simulação hidráulica que permite obter o consumo horário, o caudal e a potência das várias combinações possíveis de bombas. Esses valores são armazenados em matrizes de dimensões apropriadas.

xv. Cálculo dos limites da variável de controlo (restrições de desigualdade) e da estimativa inicial da variável de controlo

O cálculo dos limites é feito com base no consumo horário e na capacidade máxima e mínima de água no reservatório. A solução inicial é calculada fazendo a média entre os dois limites da variável de controlo.

xvi. Definição das restrições de igualdade

Relativas às restrições expostas anteriormente em que o volume de água no reservatório no instante inicial e final seja o mesmo, e que na hora anterior ao início do período de custo de energia mais elevado, o reservatório esteja cheio e no final desse mesmo período esteja com a sua capacidade mínima.

xvii. Optimização da função objectivo através da função *fmincon*

O cálculo da função objectivo baseia-se no modelo de controlo exposto em 4.1 calculando para cada período: o caudal que é necessário elevar, o número de GE’s que é necessário ligar e o tempo que têm de permanecer ligados, a energia consumida por cada bomba e o seu custo.

Neste passo pede-se ao utilizador que defina os coeficientes K1 e K2 correspondentes aos coeficientes w_L e w_E expostos no capítulo 4.1.2.

xviii. Envio dos resultados finais para o monitor

Os resultados finais enviados para o monitor são o custo final de energia eléctrica, a percentagem de utilização de cada GE, o número de bombas a utilizar em cada período tarifário bem como o tempo em que devem permanecer ligados e os níveis de água no reservatório iniciais e finais para cada período.

O código utilizado para o desenvolvimento do programa encontra-se no ANEXO C.

5

APLICAÇÃO DO PROGRAMA DE OPTIMIZAÇÃO A UM CASO REAL

Para comprovar os resultados alcançados pelo programa de optimização criado, é necessário aplicá-lo a um sistema real cuja rede hidráulica esteja representada no programa EPANET 2.0. Para tal, estudou-se um trecho do Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água do Baixo Cávado e Ave que engloba a estação elevatória que comporta maiores encargos em termos de factura energética.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

O sistema adutor utilizado, representado na Figura 15, é composto pelo reservatório de água tratada da ETA, com uma capacidade de 20.000 m^3, pela estação elevatória 1 (EE 1), pelo reservatório de Adães e por tubagens e válvulas que complementam o sistema.
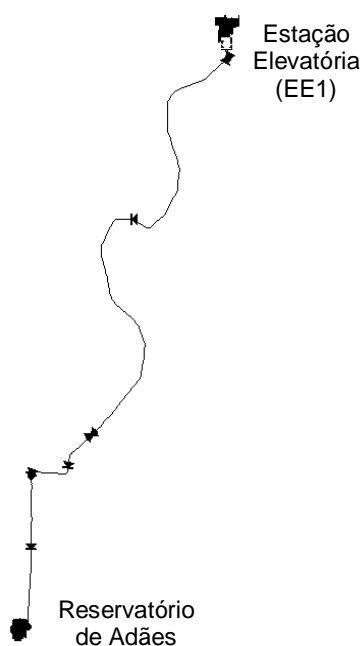
Figura 15. Representação do sistema adutor utilizado.

5.1.1 MODELO HIDRÁULICO

5.1.1.1 Reservatórios

O sistema em estudo possui 3 reservatórios: 1 de nível fixo (reservatório que alimenta a EE) e 2 de nível variável (que são abastecidos pela EE).

Considerou-se neste estudo que o reservatório de nível fixo tem sempre disponibilidade de água pelo que a descrição das suas características se torna desnecessária.

As características dos reservatórios abastecidos estão expostas na Tabela 4.

Tabela 4. Características dos reservatórios de nível variável.

	Diâmetro (m)	Capacidade (m^3)	Cota (m)	
			Base	**Pleno**
RNV 1	25,4	2523	143,7	148,68
RNV 2	25,4	2523	143,7	148,68
Total Reservatórios	35,9[1]	5047	143,7	148,68

[1] Corresponde ao diâmetro equivalente, para a capacidade total, e não à soma dos diâmetros.

5.1.1.2 Estação Elevatória

O sistema em estudo incorpora uma EE extremamente importante pois depende dela todo o funcionamento da rede a jusante. A estação está equipada com 3 GE's iguais (marca Worthington, modelo 350-LNN-725) associados em paralelo e que em conjunto elevam um caudal 2966 l/s, para uma altura manométrica de 133 m.

As dimensões do edifício da EE1 são de 55 m de comprimento, por 13 m de largura e altura variável, estando o poço de bombagem à cota 11,10 m.

Na Tabela 5 estão as combinações possíveis de bombas e o caudal elevado, potência consumida, altura manométrica e rendimento para cada combinação.

Tabela 5. Caudal elevado e potência consumida para as combinações possíveis de GE's.

Combinação das Bombas			**Caudal Elevado**	**Potência**	**Altura Manométrica**	**Rendimento**
Bomba 1	**Bomba 2**	**Bomba 3**	**(l/s)**	**(kW)**	**(m)**	**(%)**
OFF	OFF	OFF	0	0	0	0
ON	OFF	OFF	1038,7	1599	128,9	81,98
ON	ON	OFF	2036,1	3180	130,8	81,98
ON	ON	ON	2966,3	4654	133,4	83,18

A curva característica das bombas aqui utilizada é a que constava no ficheiro EPANET cedido pelas AdC, e está representada na Figura 16.
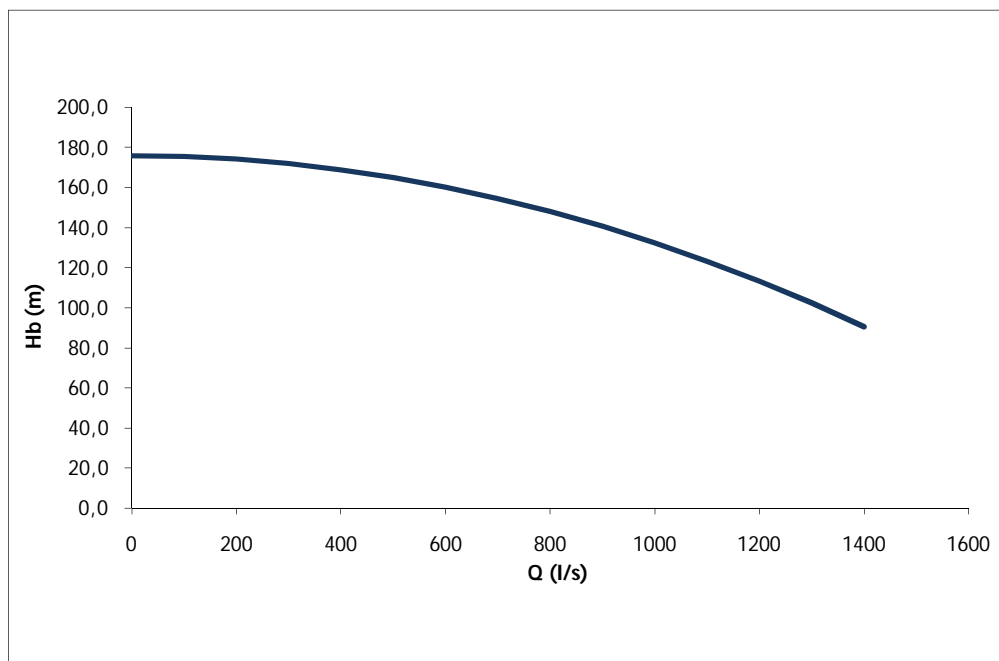
Figura 16. Curva característica das bombas existentes na EE1.

Devido à inexistência de dados para obter a curva de rendimento das bombas, arbitrou-se uma curva hipotética representada na Figura 17.
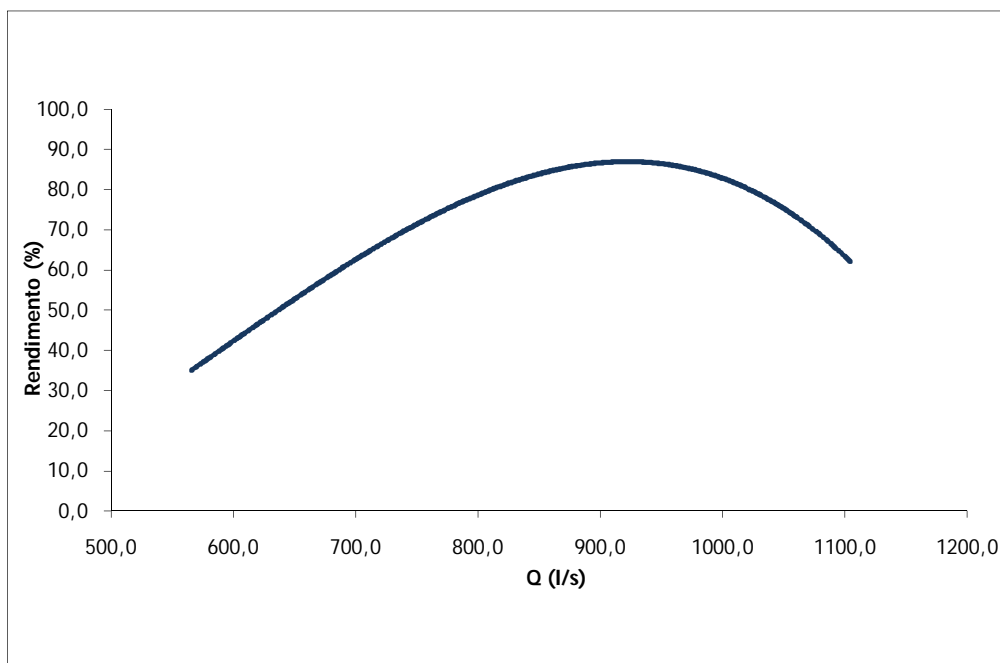
Figura 17. Curva de rendimentos das bombas existentes na EE1.

5.1.1.3 Adutoras

O sistema elevatório estudado possui cerca de 3744 m de condutas adutoras.

No que diz respeito aos materiais, a rede está executada em ferro fundido dúctil. Os diâmetros das tubagens do sistema em estudo variam entre o DN100 e DN 1400 mm.

5.1.2 PADRÃO HORÁRIO DE CONSUMO ESPERADO

Para a geração do modelo de simulação a AdC disponibilizou registos dos consumos à saída do reservatório de Adães, relativos ao ano de 2008.

Os registos apresentam caudais de saída do reservatório (em m^3/h) calculados através da variação do volume no reservatório, tendo em conta que o caudal que entra é conhecido. Esses valores são registados a cada 10 minutos, excepto se houver alguma alteração brusca nos mesmos.

A partir dos valores fornecidos, calculou-se a média horária, o desvio padrão e o factor de consumo associado.

Devido à incerteza associada a estes registos, decidiu-se utilizar dados de consumo de dois dias úteis, para duas épocas do ano distintas.

Os dias escolhidos para utilizar na simulação foram o dia 8 de Julho de 2008 e o dia 8 de Janeiro do mesmo ano.

Assim, para o consumo diário do dia 8 de Julho obteve-se o valor de 92192 m^3, a que corresponde um caudal médio diário de 1067 l/s. O caudal consumido varia ao longo do dia entre 41 l/s e 1555 l/s. A variação horária do consumo é obtida multiplicando o caudal médio diário valor pelos factores horários representados na Figura 18.
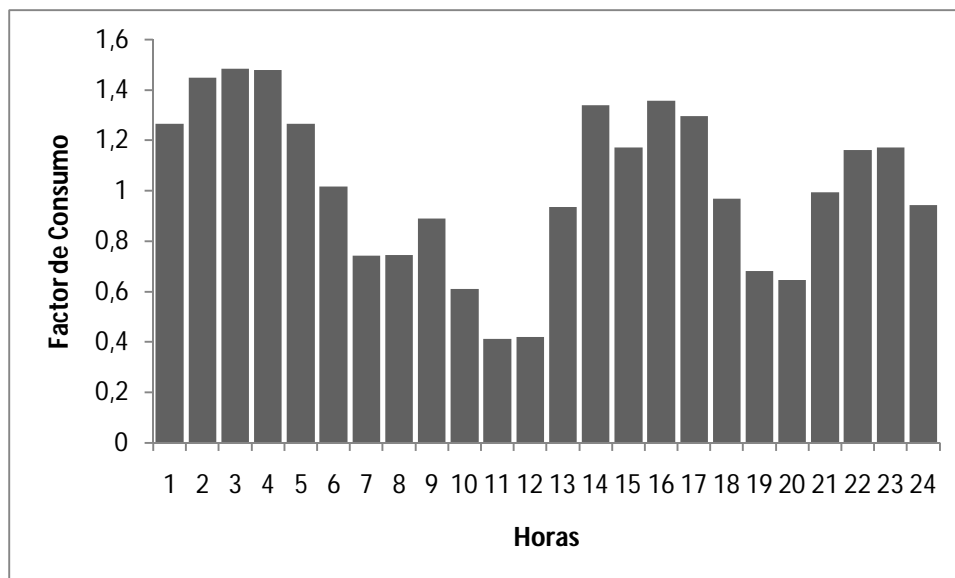
Figura 18. Factores horários de consumo de água para o dia 8 de Julho de 2008.

Para o dia 8 de Janeiro de 2008 obteve-se, para o consumo diário o valor de 73733 m^3, a que corresponde um caudal médio diário de 853 l/s. O caudal consumido varia ao longo do dia entre 356 l/s e 1463 l/s. A variação horária do consumo é obtida multiplicando o caudal médio diário valor pelos factores horários representados na Figura 19.
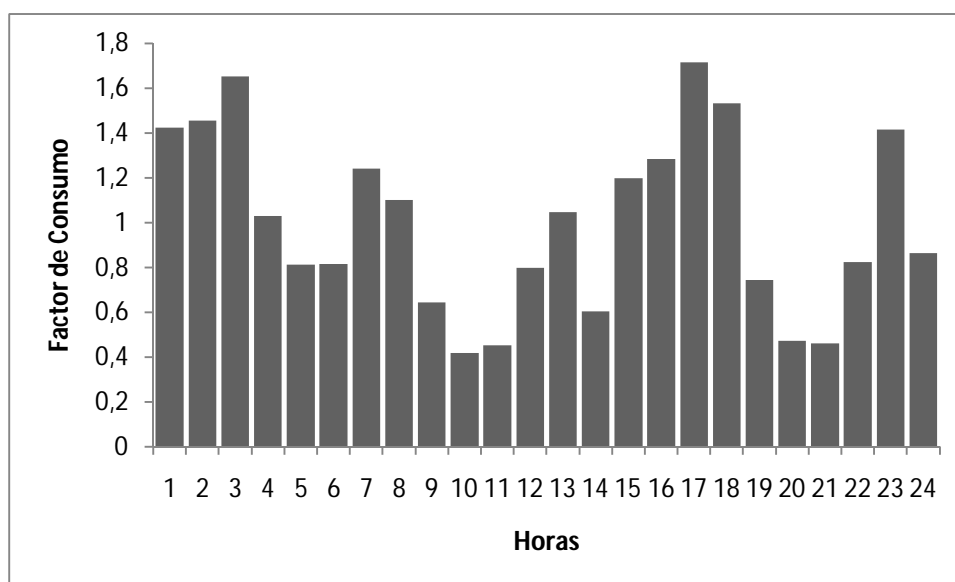
Figura 19. Factores horários de consumo de água para o dia 8 de Janeiro de 2008.

Como se pode observar na figura anterior, os picos de consumo que este reservatório tem de abastecer encontram-se nas horas fora de ponta pois é um reflexo da preocupação existente na empresa de, nas EE's a jusante do reservatório, não haver accionamento dos GE's durante as horas de tarifa de energia mais elevada.

Os valores dos factores de consumo acima expostos foram introduzidos no EPANET a fim de se poder realizar a simulação.

5.1.3 Padrão horário da tarifa eléctrica

Tendo em conta que se vão analisar dois dias correspondentes aos dois períodos de hora legal existentes, definiram-se as variações tarifárias ao longo do dia que se encontram na Figura 20 e Figura 21.
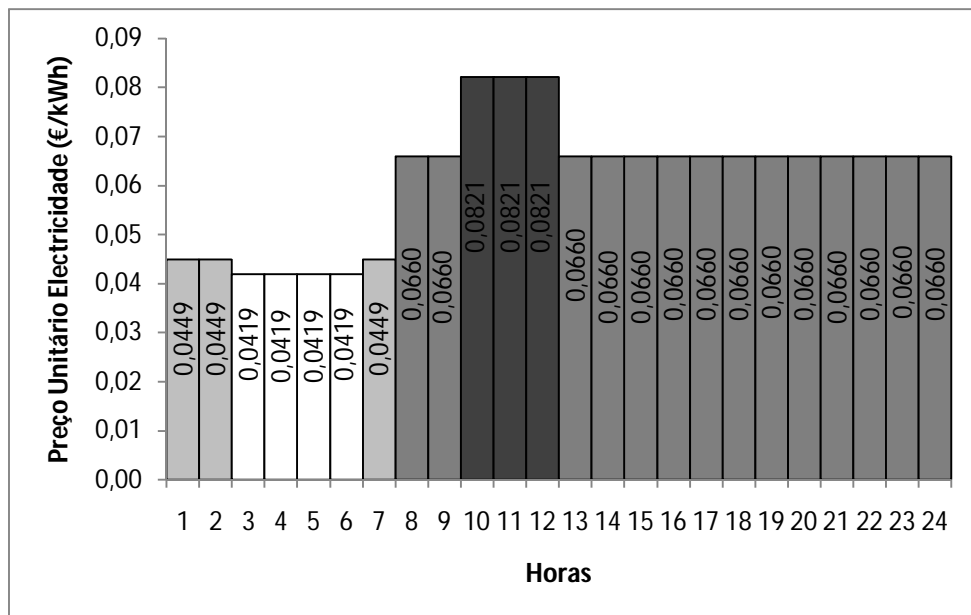
Figura 20. Variação horária da tarifa eléctrica utilizada para o período de hora legal de Verão.
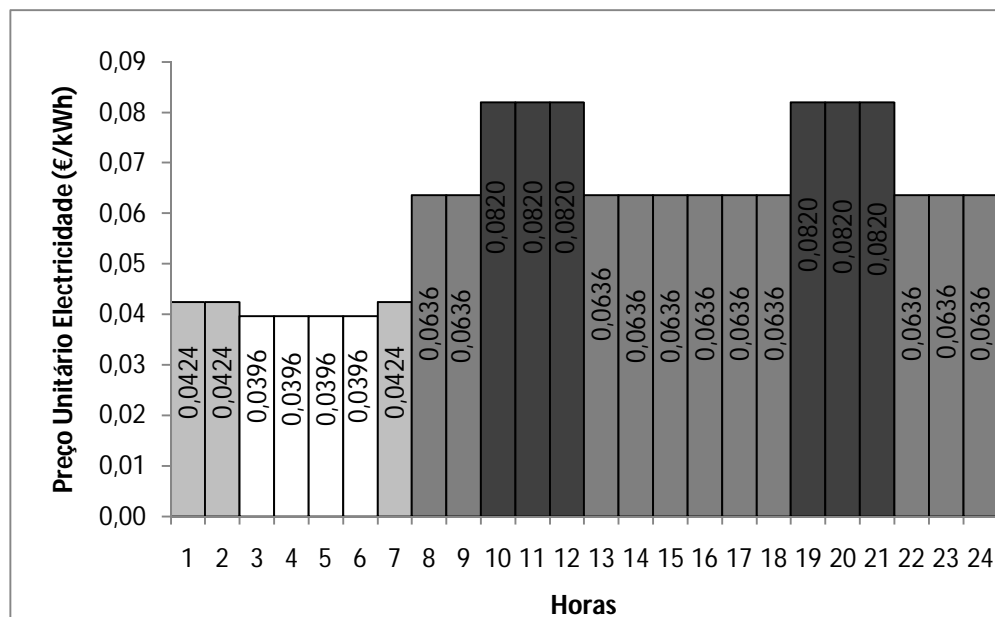
Figura 21. Variação horária da tarifa eléctrica utilizada para o período de hora legal de Inverno.

Comparando a Figura 3 e Figura 20, pode-se verificar que na segunda o período de hora de ponta foi alterado para começar e acabar às horas certas. Procedeu-se do mesmo modo sempre que os períodos não começavam ou acabavam a horas certas. Desta forma torna-se mais fácil de implementar o algoritmo pois os resultados são avaliados hora a hora.

Estes dois padrões de variação do preço de energia foram introduzidos nos ficheiros de texto ‘tarifario_verao.txt’ e ‘tarifario_inverno.txt’.

5.2 DADOS DE ENTRADA NO PROGRAMA

Tal como descrito no capítulo anterior, é preciso especificar alguns parâmetros no início do programa. Para a análise dos resultados deste caso de estudo fixaram-se os seguintes valores:

- Altura máxima de água admissível nos reservatórios – 4,98 m
- Altura mínima de água admissível nos reservatórios – 2,0 m
- Diâmetro dos reservatórios – 25,4 m
- Período de hora legal a utilizar para o tarifário de energia – utilizaram-se os dois
- K_1 – 1
- K_2 – 1

5.3 RESULTADOS OBTIDOS

Neste subcapítulo serão apresentados e analisados os resultados obtidos através da aplicação do programa desenvolvido ao caso de estudo para dois dias úteis em diferentes períodos de hora legal.

O funcionamento dos GE's da EE está condicionado pelo nível da água nos reservatórios para os quais elevam a água e pelas variações horárias do consumo de água e da tarifa eléctrica. No programa desenvolvido tenta-se que o número de arranques e paragens seja minimizado.

Foi fixado como restrição que o volume de água nos reservatórios não poderia ser superior ao volume máximo admissível e inferior ao volume mínimo. Para além dessa restrição, no decorrer do programa são actualizados os controlos simples das bombas de forma a ligá-las quando é atingido o nível mínimo de água e, desligá-las quando se atinge o nível máximo.

Após o conhecimento do número de bombas necessárias, tempo de funcionamento das mesmas e níveis de água iniciais e finais no reservatório para cada período, é possível simular com o EPANET a solução obtida de uma forma relativamente simples. Basta introduzir controlos com condições múltiplas em que são definidos para cada período, os níveis de água num dos reservatórios que alteram o estado das bombas.

Os níveis de água que controlam o estado das bombas foram definidos tendo em conta os seguintes critérios:

- Se a bomba funcionar o tempo total do período, os níveis foram definidos para que a bomba ligue no nível inicial do período e desligue quando é atingida a altura máxima de água definida;
- No período de ponta, a bomba só liga quando o nível de água atinge o mínimo definido;
- Se a bomba não funcionar durante todo o tempo do período, tenta-se procurar o melhor instante para a ligar tendo em conta o nível de água que deve ser atingido no final desse período.

5.3.1 DIA 08 DE JULHO DE 2008 (TARIFÁRIO DE HORA LEGAL DE VERÃO)

5.3.1.1 Resultados Obtidos com o Programa de Optimização

Tal como referido anteriormente, o dia em estudo neste ponto enquadra-se no tarifário correspondente à hora legal de Verão. Tal como definido em 2.3, este tarifário foi dividido em 6 períodos.

O número de bombas necessárias para elevar o volume necessário, em cada período tarifário, bem como o factor de utilização das mesmas em cada período, está presente na Tabela 6.

Tabela 6. Número de bombas necessárias em cada período de tarifário de energia, factor de utilização e custo associado, para o dia 8 de Julho.

Período	Hora inicial	Hora final	Nº horas período	Nº de bombas necessárias	Factor de Utilização (%)		Custo (€)	
					Bomba 1	Bomba 2	Bomba 1	Bomba 2
1	00:00	02:00	2	2	100,0	18,8	143,7	26,7
2	02:00	06:00	4	2	100,0	26,6	268,2	70,5
3	06:00	07:00	1	1	100,0	0,0	71,8	0
4	07:00	09:00	2	1	71,1	0,0	150,1	0
5	09:00	12:00	3	1	14,9	0,0	58,6	0
6	12:00	24:00	12	1	91,8	0,0	1162,9	0

Analisando a tabela anterior verifica-se que, embora haja a preocupação de ter o reservatório no seu nível máximo de água no final da hora anterior ao período de ponta, nem sempre é possível evitar o funcionamento dos GE's no período do dia com tarifa de energia mais elevada. A percentagem de utilização das bombas nesse período é a necessária para que no final do mesmo, a altura da água seja igual à mínima admissível.

Na Tabela 7 estão descritos os resultados obtidos para o nível de água inicial e final nos reservatórios para cada período.

Tabela 7. Resultados obtidos para o nível de água inicial e final no reservatório para cada período, para o dia 8 de Julho de 2008.

Período	Hora inicial	Hora final	Nº horas período	Nível de Água Inicial (m)	Nível de Água Final (m)
1	00:00	02:00	2	2,00	2,00
2	02:00	06:00	4	2,00	3,68
3	06:00	07:00	1	3,68	4,98
4	07:00	09:00	2	4,98	4,98
5	09:00	12:00	3	4,98	2,00
6	12:00	24:00	12	2,00	2,00

Na Tabela 8 encontram-se os valores diários obtidos através do programa de optimização para o factor de utilização das bombas e o custo associado. Para este dia analisado, o custo total estimado após optimização da política operacional da EE é de 1953,23 €.

Tabela 8. Custo diário de energia eléctrica e factor de utilização das bombas para o dia 08 de Julho de 2008.

Bomba	Factor de Utilização (%)	Custo (€/dia)
1	82,85	1855,61
2	5,99	97,62
3	0,00	0
Custo Total		**1953,23**

5.3.1.2 Resultados da Simulação com o EPANET do Resultado Obtido

A partir dos resultados expostos no ponto anterior definiram-se controlos para cada período para regular o estado das bombas. Esses controlos podem ser consultados no ANEXO D.

Na Figura 22 apresenta-se o resultado obtido com a simulação da variação ao longo do dia dos caudais "produzidos" e "consumidos".
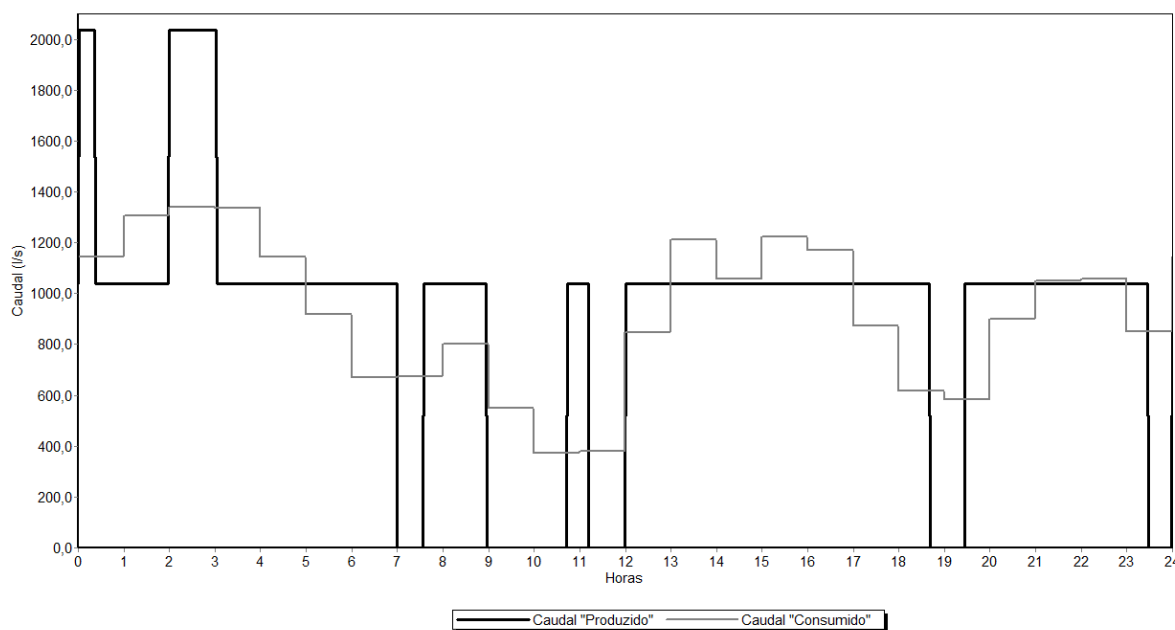
Figura 22. Resultados da simulação para o caudal "produzido" e "consumido" pelo sistema para o dia 08 de Julho de 2008.

Tal como esperado, o caudal elevado no período de custo mais elevado (entre as 9 e as 12 h) é simplesmente o necessário para que o nível de água no reservatório não seja inferior ao nível mínimo admissível.

É também possível verificar que o número de arranques de uma das bombas é 2 e da outra é igual a 5 (não se considera o arranque às 24 h pois já pertence ao dia seguinte).

Para o nível de água nos reservatórios, obteve-se o comportamento apresentado na Figura 23.
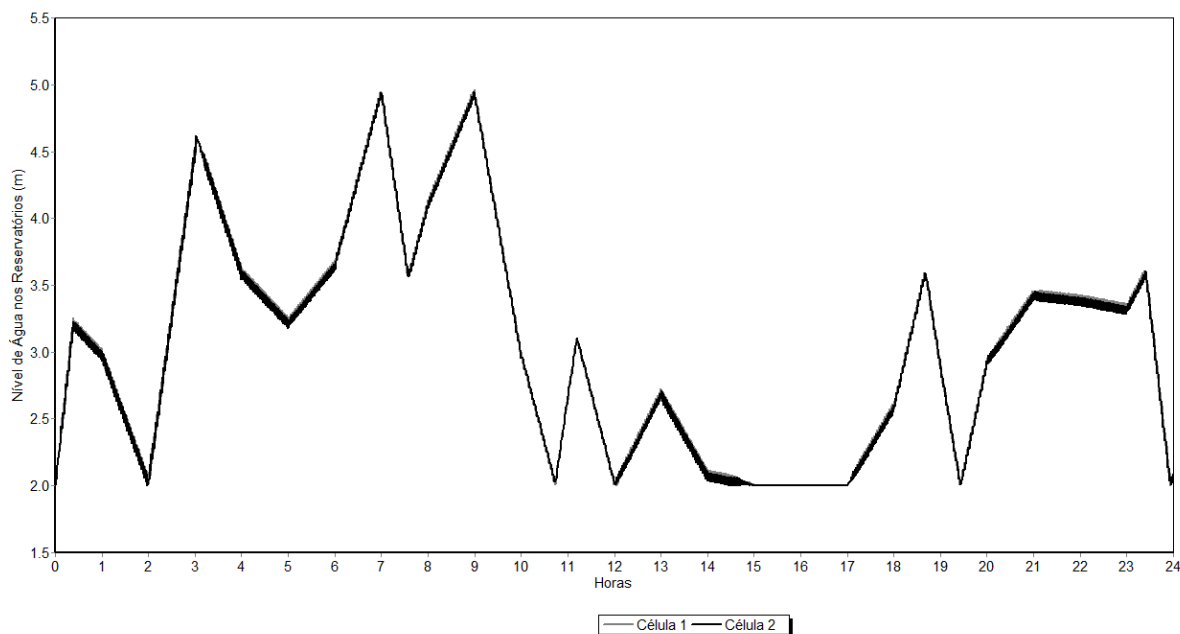
Figura 23. Resultados da simulação para a variação horária do nível de água no reservatório para o dia 08 de Julho de 2008.

Pode-se verificar através da análise da figura anterior que o nível da água no reservatório se comporta tal como esperado – encontra-se no nível máximo no início da hora de ponta e no nível mínimo no final da mesma, e o nível inicial e final são aproximadamente o mesmo.

No que diz respeito ao factor de utilização das bombas em cada período, obtiveram-se os resultados presentes na Tabela 9.

Tabela 9. Resultados da simulação para o factor de utilização de cada bomba para cada período.

Período	Factor de Utilização	
	Bomba 1	Bomba 2
1	100%	18%
2	100%	26%
3	100%	0%
4	69%	0%
5	16%	0%
6	89%	0%

O relatório de energia gerado pelo EPANET encontra-se na Tabela 10.

Tabela 10. Relatório de Energia gerado pelo EPANET.

Bomba	Factor de Utilização (%)	Rendimento Médio (%)	Energia por Volume (kWh/m3)	Potência Média (kW)	Potência Máxima (kW)	Custo (€/dia)
1	81,36	81,98	0,43	1598,68	1600,08	1816,74
2	5,92	81,49	0,44	1568,53	1590,63	95,06
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custo Total						**1911,80**

5.3.2 Dia 08 de Janeiro de 2008 (Tarifário de hora legal de Inverno)

5.3.2.1 Resultados Obtidos com o Programa de Optimização

Tal como já referido, o dia aqui em estudo enquadra-se no tarifário correspondente à hora legal de Inverno. Tal como definido em 2.3, este tarifário foi dividido em 8 períodos. Portanto neste ponto são apresentados os resultados para esses períodos.

O número de bombas necessárias para elevar o volume necessário, em cada período tarifário, bem como o factor de utilização das mesmas em cada período, está presente na Tabela 11.

Tabela 11. Número de bombas necessárias em cada período de tarifário de energia, factor de utilização e custo associado, para o dia 8 de Janeiro de 2008.

Período	Hora inicial	Hora final	Nº horas período	Nº de bombas necessárias	Factor de Utilização (%)		Custo (€)	
					Bomba 1	Bomba 2	Bomba 1	Bomba 2
1	00:00	02:00	2	2	100,0	19,0	135,7	25,6
2	02:00	06:00	4	2	100,0	9,0	253,4	22,6
3	06:00	07:00	1	2	100,0	1,9	67,8	1,3
4	07:00	09:00	2	1	71,6	0,0	145,7	0
5	09:00	12:00	3	1	18,7	0,0	73,8	0
6	12:00	18:00	6	2	100	15,1	610,6	91,6
7	18:00	21:00	3	1	19,0	0	74,7	0
8	21:00	24:00	3	1	84,9	0	259,2	0

Também neste caso, é necessário ligar as bombas nos períodos de energia mais cara (períodos 5 e 7) embora durante um intervalo reduzido de tempo.

Na Tabela 12 estão descritos os resultados obtidos para o nível de água inicial e final nos reservatórios para cada período.

Tabela 12. Resultados obtidos para o nível de água inicial e final no reservatório para cada período, para o dia 8 de Julho de 2008.

Período	Hora inicial	Hora final	Nº horas período	Nível de Água Inicial (m)	Nível de Água Final (m)
1	00:00	02:00	2	2,00	2,00
2	02:00	06:00	4	2,00	4,98
3	06:00	07:00	1	4,98	4,98
4	07:00	09:00	2	4,98	4,98
5	09:00	12:00	3	4,98	2,00
6	12:00	18:00	6	2,00	4,98
7	18:00	21:00	3	4,98	2,00
8	21:00	24:00	3	2,00	2,00

Na Tabela 13 podem-se consultar os resultados diários alcançados com o programa de optimização, obtendo-se um custo diário de energia eléctrica de 1762,75 €.

Tabela 13. Custo diário da energia eléctrica e factor de utilização das bombas obtido para o dia 8 de Janeiro de 2008.

Bomba	Factor de Utilização (%)	Custo (€/dia)
1	75,47	1621,00
2	6,97	141,75
3	0	0
	Custo Total	**1762,75**

5.3.2.2 Resultados da Simulação com o EPANET do Resultado Obtido

A partir dos resultados expostos no ponto anterior definiram-se controlos cada período para regular o estado das bombas. Esses controlos podem ser consultados no ANEXO E.

Na Figura 24 apresenta-se o resultado obtido com a simulação da variação ao longo do dia dos caudais “produzidos” e “consumidos”.
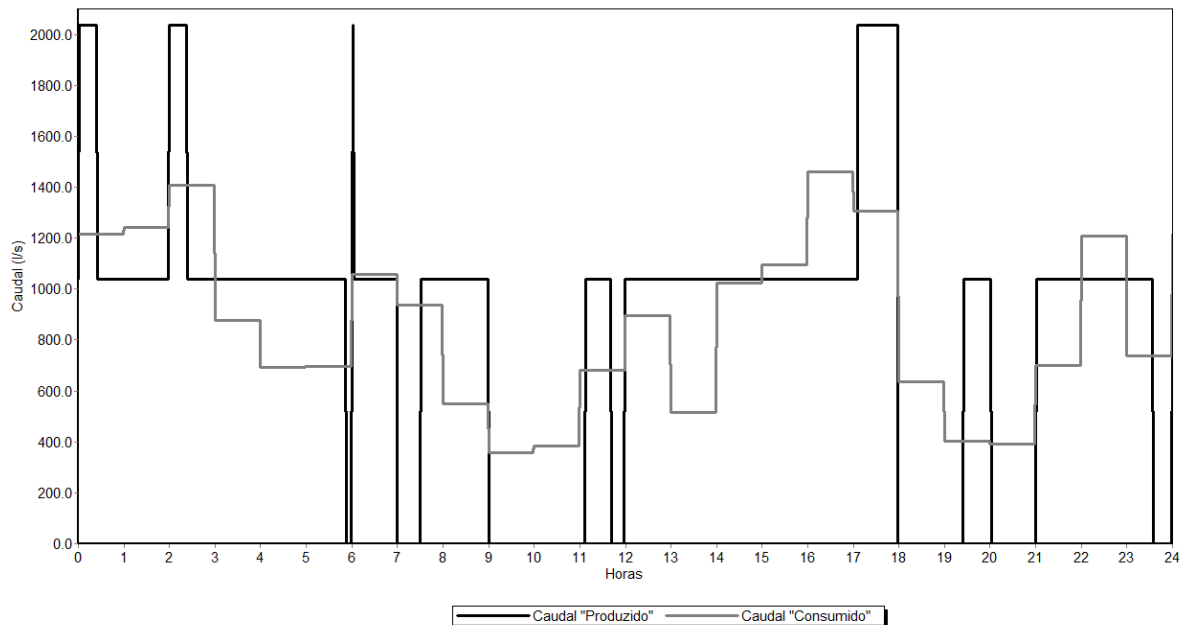
Figura 24. Resultados da simulação para o caudal “produzido” e “consumido” pelo sistema para o dia 08 de Janeiro de 2008.

Tal como esperado, o caudal elevado no período de custo mais elevado (entre as 9 e as 12 h e as 18 e as 21 h) é simplesmente o necessário para que o nível de água no reservatório não seja inferior ao nível mínimo admissível.

Neste caso o número de arranques de uma das bombas é 4 e da outra é igual a 7 (não se considera o arranque às 24 h pois já pertence ao dia seguinte).

Para o nível de água nos reservatórios, obteve-se a variação apresentada na Figura 25.
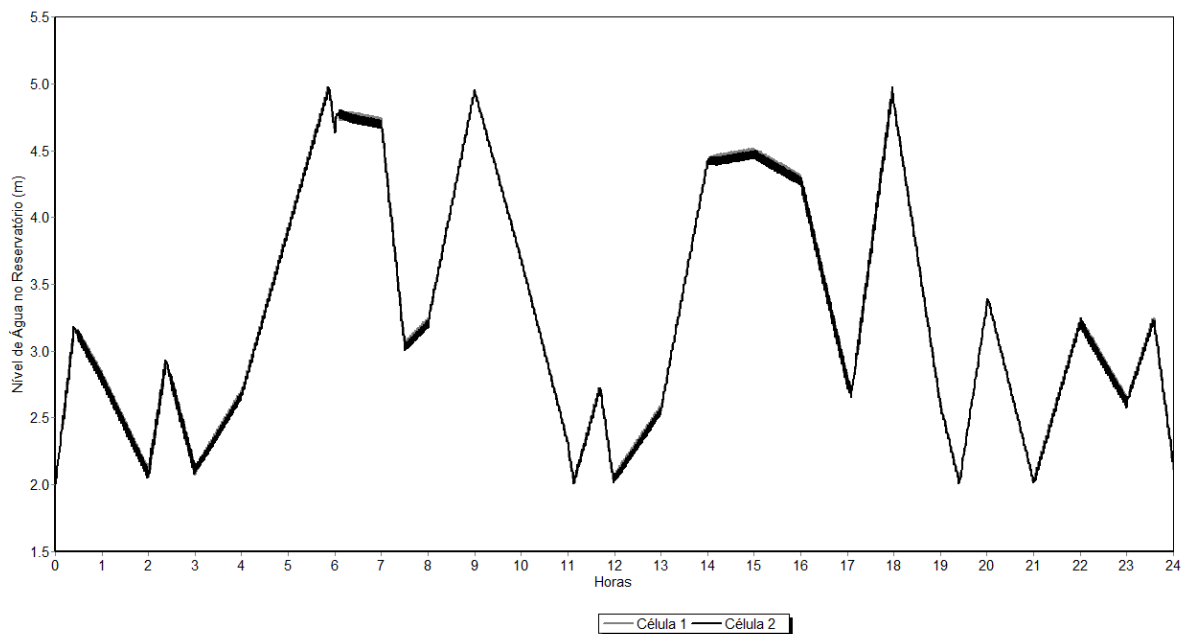
Figura 25. Resultados da simulação para a variação horária do nível de água no reservatório para o dia 08 de Janeiro de 2008.

Tal como para o caso da hora legal de Verão, também aqui o resultado da simulação é o esperado, em que a água no reservatório se encontra no nível máximo no início das horas de ponta e no nível mínimo no final da mesma, e o nível inicial e final são aproximadamente o mesmo.

Relativamente ao factor de utilização das bombas em cada período, obtiveram-se os resultados presentes na Tabela 14.

Tabela 14. Resultados da simulação para o factor de utilização de cada bomba e para cada período.

Período	Factor de Utilização	
	Bomba 1	Bomba 2
1	100%	20%
2	97%	10%
3	100%	3%
4	74%	0%
5	19%	0%
6	100%	15%
7	21%	0%
8	86%	0%

O relatório de energia gerado pelo EPANET encontra-se na Tabela 15.

Tabela 15. Relatório de Energia gerado pelo EPANET, para o dia 08 de Janeiro de 2008.

Bomba	Factor de Utilização (%)	Rendimento Médio (%)	Energia por Volume (kWh/m3)	Potência Média (kW)	Potência Máxima (kW)	Custo (€/dia)
1	75,54	81,85	0,43	1592,90	1600,08	1621,79
2	7,12	81,21	0,44	1556,51	1590,63	140,90
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custo Total						**1762,68**

5.3.3 ANÁLISE ECONÓMICA PARA ALGUNS CENÁRIOS

Para além da optimização da operação dos GE's, o programa desenvolvido pode também ser utilizado para analisar economicamente a tomada de algumas decisões respeitantes às características da rede. Neste ponto apresentam-se os resultados económicos para os cenários: diminuir a altura mínima de água nos reservatórios, ter um reservatório em manutenção e aumentar o rendimento das bombas.

São apenas apresentados os resultados para o dia 8 de Julho de 2008.

Nesta secção serão apresentados os resultados diários respeitantes ao factor de utilização dos GE's e custo da energia, sendo que os restantes podem ser consultados no ANEXO F.

A. Diminuição da altura mínima admissível de água nos reservatórios

Decidiu-se relaxar a altura mínima de água no reservatório, passando a tomar o valor de 1,5 m em vez de 2,0 m.

Na Tabela 16 estão ilustrados os resultados obtidos anteriormente e os obtidos neste cenário para o custo diário da energia e o factor de utilização das bombas.

Tabela 16. Comparação entre o custo diário da energia eléctrica e factor de utilização das bombas obtido para o dia 8 de Julho de 2008, entre o caso inicial e com a diminuição da altura mínima de água admissível no reservatório.

Bomba	Altura mínima de 2,0 m		Altura mínima de 1,5 m	
	Factor de Utilização (%)	Custo (€/dia)	Factor de Utilização (%)	Custo (€/dia)
1	82,85	1855,61	82,28	1837,81
2	5,99	97,62	6,58	107,50
3	0,00	0	0	0
Custo Total		**1953,23**		**1944,86**

Através desta análise verifica-se que ao diminuir o nível mínimo de água do reservatório em 0,5 m permite uma redução de cerca de 0,43% (8,37 €/dia), podendo ao final de um ano representar uma poupança de cerca de 3055 €.

B. Ter um Reservatório em Manutenção

Ter um reservatório em manutenção significa que a capacidade do reservatório passa a ser metade da inicial. Então, para este cenário os resultados obtidos para o custo diário da energia encontram-se na Tabela 17.

Tabela 17. Comparação entre o custo diário da energia eléctrica e factor de utilização das bombas obtido para o dia 8 de Julho de 2008, entre o caso inicial e o cenário de ter um reservatório em manutenção.

Bomba	**Dois Reservatórios em Funcionamento**		**Um Reservatórios em Funcionamento**	
	Factor de Utilização (%)	**Custo (€/dia)**	**Factor de Utilização (%)**	**Custo (€/dia)**
1	82,85	1855,61	84,18	1902,69
2	5,99	97,62	4,60	75,32
3	0,00	0	0	0
Custo Total		**1953,23**		**1978,01**

Neste caso, o custo diário é ligeiramente superior ao inicial devido à diminuição do volume disponível de água. O custo obtido neste cenário é cerca de 1,3 % superior ao inicial.

C. Aumento do Rendimento dos Grupos Elevatórios

Neste cenário aumenta-se o rendimento dos GE's através da alteração da sua curva de rendimento no EPANET. No caso inicial as bombas apresentam um rendimento de cerca de 82 % e neste cenário esses valores foram alterados para 84 %. Na Tabela 18 apresentam-se os resultados obtidos para este cenário, do custo da energia.

Tabela 18. Comparação entre o custo diário da energia eléctrica e factor de utilização das bombas obtido para o dia 8 de Julho de 2008, entre o caso inicial e o cenário de aumentar o rendimento dos GE's.

Bomba	Caso Inicial		Aumento do Rendimento dos GE's	
	Factor de Utilização (%)	**Custo (€/dia)**	**Factor de Utilização (%)**	**Custo (€/dia)**
1	82,85	1855,61	82,85	1811,43
2	5,99	97,62	5,99	95,30
3	0,00	0	0	0
Custo Total		**1953,23**		**1906,79**

Com a alteração do rendimento das bombas, consegue-se uma redução no custo diário da energia de cerca de 2,4 % (46 €/dia).

6

CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho mostram a viabilidade da aplicação do programa desenvolvido no sector de abastecimento de água, pois esses resultados podem ser facilmente aplicados a um sistema real. O programa criado provou ser uma ferramenta de auxílio eficiente para os gestores de sistemas adutores, pois apresenta de forma simples a política operacional optimizada para bombas e o seu custo associado para cada período do tarifário de energia existente.

Além de auxiliar na optimização da política operacional das estações elevatórias, o programa desenvolvido serve também para avaliar economicamente possíveis acções a tomar sobre a rede de abastecimento, tal como o aumento da capacidade dos reservatórios.

A ferramenta desenvolvida requer um baixo tempo computacional, sendo que o tempo total médio para realizar a optimização é de 1,14 minutos.

Os resultados obtidos são os esperados, tentando-se elevar o máximo de água durante a noite, evitando ao máximo a utilização das bombas nos escalões energéticos mais caros.

A simulação dos resultados obtidos foi a esperada, verificando-se que para o caso do dia 8 de Julho na simulação o factor de utilização das bombas é menor do que o obtido na optimização, o que se reflecte num custo diário de energia 2 % inferior ao esperado. Esta diferença deve-se a que em alguns períodos foi impossível atingir os níveis de água finais no reservatório (embora sejam diferenças máximas de 0,1 m, é o suficiente para justificar a diferença no custo final). Para o caso de 8 de Janeiro de 2008, o valor do custo total obtido e do factor de utilização das bombas após simulação é praticamente igual (1962,75 €, na optimização e, 1962,68 € na simulação), sendo portanto o esperado. Ainda através da simulação pode concluir-se que, para o caso de Julho são efectuados 5 arranques de uma bomba (bomba 1) e 2 de outra (bomba 2) e, para o caso de Janeiro, esses valores aumentam em dois arranques por bomba passando a ter-se 7 arranques para o primeiro grupo elevatório e 4 para o segundo.

Concluindo, constata-se que com cálculos relativamente simples consegue-se melhorar a eficiência económica de uma estação elevatória. Este estudo estimula ao desenvolvimento de modelos de controlo para aplicação a sistemas mais complexos, com mais do que uma estação elevatória e vários reservatórios de distribuição, e para aplicação em tempo real em que existe uma monitorização constante do consumo, sendo a política operacional óptima alterada a cada variação do consumo.

BIBLIOGRAFIA

ÁGUAS DO CÁVADO, S.A.(2009). *Águas do Cávado, S.A.* Acedido em 2009, em http://www.aguas-cavado.pt/

COULBECK, B. AND C. H. ORR (1982). *Optimized Pump Scheduling for Water Supply Systems*. IFAC Third Symposium, Control of Distributed Parameter Systems, Toulouse, France.

COULBECK, B., M. BRDY, AND C. H. ORR (1987). *Exact Incorporation of Maximum Demand Charges in Optimal Scheduling of Water Distribution Systems*. IFAC Tenth Triennial World Congress, Munich, Federal Republic of Germany, pp. 359–364.

ERSE (2008). *Tarifário de Venda de Energia Eléctrica a Clientes Finais, Despacho nº 22/2008.* Portugal. Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos

FIGUEIREDO, M. M., & MARTINS, J. M. (2007). *Minimização do Custo da Energia em Estações Elevatórias de Abastecimento de Água.*

GOLDMAN, F. E., SAKARYA, A. B A., ORMSBEE, L. E., UBER, J. G., MAYS, L.W. (2000) - *Optimization Models for Operations*. in Mays, L., ed., Water Distribution Systems Handbook, American Water Works Association, McGraw-Hill, New York, pp. 16.1-16.47.

JOWITT, P. W., AND GERMANOPOULOS, G. (1992). *Optimal pump scheduling in water-supply networks*. Journal of Water Resources Planning and Management-Asce, 118(4), 406-422.

KO, S. K.; OH, M. H.; FONTANE, D.G. (1997). *Multiobjective Analysis of Service – Water – Transmission Systems*. Journal of Water Resources Planning and Management, v. 123, n. 2, March, p. 79 – 83.

LNEC. (2004).*Manual do utilizador do EPANET 2.0 - Simulação hidráulica e de parâmetros de qualidade em sistemas de transporte e distribuição de água,* IRAR/LNEC (2004), Lisboa.

LÓPEZ-IBÁÑEZ, M., DEVI PRASAD, T., AND BEN PAECHTER.(2005). *Optimal pump scheduling: Representation and multiple objectives*. In Dragan A. Savic, Godfrey A. Walters, Roger King, and Soon Thiam-Khu, editors, Proceedings of the Eighth International Conference on Computing and Control for the Water Industry *(CCWI2005)*, volume 1, pages 117-122, University of Exeter, UK, September 2005.

NITIVATTANANON V.; SADOWSKI, C. E.; QUIMPO, R. G. (1996). *Optimization of Water Supply System Operation*. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, v. 122, N° 5, p. 374-384, New York, NY, USA.

ORMSBEE, L. E.; LANSEY. K. E (1994). *Optimal Control of Water Supply Pumping Systems.* Journal of Water Resources Planning and Mangement, v. 120, n. 2, March, p.237-252.

OSTFELD A. AND SHAMIR U. (1993), *Optimal Operation of Multiquality Networks I: Steady State Conditions*, Journal of Water Resources Planning and Management Division, ASCE, Vol. 119, No. 6, pp. 645 - 662.

OSTFELD A. AND SHAMIR U. (1993), *Optimal Operation of Multiquality Networks II: Unsteady Conditions*, Journal of Water Resources Planning and Management Division, ASCE, Vol. 119, No. 6, pp. 663 - 684.

TSUTIYA, M. T.(2001) *Redução do Custo de Energia Elétrica em Sistemas de Abastecimento de Água*. ABES.

ANEXO A

FUNÇÕES UTILIZADAS NO MATLAB DA TOOLBOX DE COMUNICAÇÃO COM O EPANET

As funções utilizadas da Toolbox no desenvolvimento do algoritmo foram:

- ENepanet – corre uma simulação completa no EPANET na biblioteca “epanet2”. A comunicação é feita através do código,

  error_code = ENepanet(estado).

- ENopen – para comunicar ao toolkit do EPANET o nome do ficheiro com a definição da instalação (extensão “inp”), o nome do ficheiro para escrever o “report” da resolução (extensão “rep”) e o nome do ficheiro binário de “output” (extensão “out”). A comunicação é feita através do código,

  ENopen(input_file,report_file,output_file)

- ENgetflowunits – verifica as unidades de caudal utilizadas na simulação. Se o caudal não estiver em l/s termina a execução do programa. O código utilizado é:

  ENgetflowunits ~= EN_LPS

- ENsaveinpfile – grava a configuração actual da rede a simular num ficheiro de extensão “inp”. O código utilizado é:

  ENsaveinpfile (nome do ficheiro).

- ENgetcount – devolve o número de componentes de um determinado tipo (nós, RNV e RNF, “links”, padrões temporais, curvas e controlos simples) existentes na rede a simular. O código utilizado é, por exemplo:

  ENgetcount (EN_LINKCOUNT).

- ENgetnodetype – devolve o tipo de nó (junção, RNV ou RNF) para um nó específico. O código utilizado é:

  ENgetnodetype (index do nó).

- ENgetlinktype – devolve o tipo de link (tubagem, bomba, válvula) para um link específico. O código utilizado é:

  ENgetlinktype (índex do link).

- ENgetlinkvalue – devolve o valor de um parâmetro especificado de um link específico. A chamada da função é feita através de, p.e.:

  ENgetlinkvalue(índex_link,EN_DIAMETER).

- ENsetlinkvalue – ajusta o valor de um parâmetro de um link. O código a utilizar é, p.e.:

  ENsetlinkvalue(índex_link,EN_STATUS).

- ENgetnodevalue – devolve o valor de um parâmetro especificado de um nó específico. A chamada da função é feita através de, p.e.:

  ENgetnodevalue(índex_nó,EN_DEMAND).

- ENgetnodeindex – devolve o valor do índex de um nó com um ID específico.

  ENgetnodeindex(ID);

- ENgettimeparam – devolve o valor de um parâmetro temporal de análise específico.

  ENgettimeparam(EN_DURATION).

- ENgetpatternlen – devolve o número de períodos temporais de um padrão específico.

  ENgetpatternlen(index_padrão).

- ENsetcontrol – define os parâmetros de um controlo simples específico e já existente.

  ENsetcontrol(índex_controlo,EN_LOWLEVEL,index_link_a_controlar,status_link,index_nó_de_controlo,pressão_ou_altura_agua_nó).

- ENopenH – inicializa a análise do sistema hidráulico. Possibilita a realização de uma simulação dinâmica com acesso a resultados em cada intervalo de tempo definido.

- ENinitH – atribui valores aos níveis dos reservatórios, estado dos links, bombas, válvulas e tempo da simulação, antes de fazer uma análise hidráulica. Deve suceder a chamada da função ENopenH.

  ENitiH(1).

- ENrunH – realiza a análise hidráulica num certo período de tempo, t, particular da simulação total.

  t=ENrunH.

- ENnextH – controla, através da variável tstep, o tempo decorrido da simulação hidráulica.

  tstep=ENnextH.

- ENcloseH – encerra a análise hidráulica da rede uma vez percorridos todos os intervalos de tempo da simulação hidráulica.

- ENsaveH – transfere os resultados da simulação hidráulica do ficheiro binário hidráulico para o ficheiro binário de output, onde os resultados são reportados em intervalos de tempo uniformes.

- ENreport – escreve um relatório de texto formatado com os resultados da simulação no ficheiro de *report*.

ANEXO B

FICHEIROS DE TEXTO COM OS TARIFÁRIOS DE ENERGIA

A. Ficheiro de texto correspondente ao tarifário de energia eléctrica para o período de hora legal de Verão

Tarifário de Energia para o período de Verão - DIA ÚTIL

Número de períodos tarifários

6

Hora Início	Hora Fim	Custo (€/kWh)
0	2	0.0449
2	6	0.0419
6	7	0.0449
7	9	0.0660
9	12	0.0821
12	24	0.0660

FIM

B. Ficheiro de texto correspondente ao tarifário de energia eléctrica para o período de hora legal de Inverno

Tarifário de Energia para o período de Inverno - DIA ÚTIL

Número de períodos tarifários

8

Hora Início	Hora Fim	Custo (€/kWh)
0	2	0.0424
2	6	0.0396
6	7	0.0424
7	9	0.0636
9	12	0.0820
12	18	0.0636
18	21	0.0820
21	24	0.0636

FIM

ANEXO C

PROGRAMA DESENVOLVIDO

A. Programa Principal

```
% programa epanet_energia_ee
% """"""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""
% Programa para o cálculo da energia consumida por uma Estação Elevatória (EE) e do respectivo
custo.
%
% O periodo em análise devará ser de 24 horas. No caso de se simular um período múltiplo (dois ou
mais dias) serão calculados valores médios diários.
%
% A Estação Elevatória poderá estar equipada com vários grupos elevatórios (GE's), eventualmente
com distintas Curvas Características (CCB's) e Curvas de Rendimentos (CRB's). São quantificados,
para cada um dos GE's, o consumo de energia, o respectivo custo, a percentagem de tempo de
% operação, potência média, rendimento médio, etc.
%
% O comportamento dos reservatórios abastecidos também é observado e representado graficamente.
%
% O caudal total "produzido" e "consumido" é calculado e representado graficamente.
%
%
%
% Autor: Ana Costa
% MIEA
% Início: 15 de Maio de 2009
%
% Final: 11 de Julho de 2009
%
% Este programa utiliza a Toolbox de comunicação com o Epanet desenvolvida por André Vieira
(Engenheiro Civil e Mestre em Hidráulica pela FEUP).
%
%
% ATENÇÃO: este programa foi escrito e testado para o "epanet2.dll" de 25/Fev/2008, versão US
(EPA).
%
% """"""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""
%
++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
% Identificação das VARIÁVEIS utilizadas:

% alfa_periodo(i,n) ........ Matriz coluna para registar a fracção do tempo total do período i que a
bomba n está a funcionar. (i=1:N_periodos e n=1:N_Pumps)
%
% consumo (i,1) ............ Matriz coluna para registar o consumo em cada instante i.
(i=1:N_pattern_tstep).

% custo_bomba_periodo (i,n). Matriz para registar o custo da bomba n no período i. (i=1:N_periodos e
n=1:N_Pumps)

% custo_total_periodo ...... Variável para registar o custo diário da energia.

% custo_total_bomba(1,i) ... Matriz para registar o custo diário da bomba i. (i=1:N_Pumps)

% diametro (i,1) ........... Diâmetro dos "Tanks" em m. (i=1:N_Tanks).
```

% diametro_eq .... Variável para registar o diâmetro do reservatório correspondente à capacidade dos n RNV's existentes

% DT_periodo (i,n) ……. Matriz para registar o tempo (em segundos) que a bomba n tem de estar a funcionar no período i. (i=1:N_periodos e n=1:N_Pumps).

% duracao_horas .... Variável com a duração (em horas) da simulação do comportamento da instalação pelo Epanet.

% energia(i,1) .... Matriz coluna para registar a energia total (em kWh) consumida por cada GE da EE no período de tempo simulado; (i=1:N_Pumps).

% energia_periodo(i,1) ...... Matriz coluna para registar a energia total (em kWh) consumida por cada GE da EE em cada período de tarifário; (i=1:N_periodos).

% estado .... Variável auxiliar para definir o estado do EPANET; definição detalhada em 'ENepanet.m'.

% final_file .... Variável com o nome do ficheiro '.inp' com a configuração final do problema.

% flnam_global .... Variável com o nome global do problema (s/ extensão).

% h_agua_periodo (i,1) ...... Matriz coluna para registar a altura da água no final do período i. (i=1:N_periodos)

% h_agua_reserv (n,1) .... Matriz coluna com a altura de água nos reservatório em cada periodo n. (n=1:N_periodos).

% H_B (i,1) .... Matriz coluna para registar a altura manométrica das bombas. (i=1:N_Pumps)

% hi_hf_c (i,1) .... Matriz para registar o conteúdo do ficheiro de texto que contém o tarifário de energia. (i=1:N_periodos)

% h_max (i,1) .... Vector com as alturas máximas admissíveis de água nos "Tanks" de ordem nt. (i=1:N_Tanks).

% h_min (i,1) .... Vector com as alturas mínimas admissíveis de água nos "Tanks" de ordem nt. (i=1:N_Tanks).

% horas_periodo (i,1) ...... Matriz coluna para registar o número de horas existentes em cada período (i=1:N_periodos)

% hyd_file .... Variável com o nome do ficheiro '.hyd' binário, não formatado, utilizado para armazenar os resultados da simulação hidráulica.

% ii_to_nd (i,1) .... Matriz coluna com o index do "node's" que estão associados aos padrões de consumo; (i=1:N_nodes)

% ii_to_np(i,1) .... Matriz coluna com o index do "link" correspondente ao GE de ordem 'np'; (i=1:N_Pumps).

% ii_to_nt(i,1) .... Matriz coluna com o index do "node" correspondente ao "tank (RNV)" de ordem 'nt'; (i=1:N_Tanks).

% inicial_file .... Variável com o nome do ficheiro '.inp' com a configuração inicial do problema.

% input_file .... Variável com o nome global do problema e extensão "inp"; define o nome do ficheiro com a rede a simular.

% K .... Variável que representa 60 segundos de 1 minuto.

% N_Control .... Contador de controlos simples.

% N_Curve .... Contador de curvas (CCB's, CCR's, etc).

% N_Junctions .... Contador do número de nós (Junctions).

% N_Junctions_1 .... Contador auxiliar do número de nós (Junctions)

% N_links .... Número de "links": condutas (Pipes) + condutas c/ válvulas de retenção (CV: Check Valve) + válvulas (Valves) + bombas (Pumps).

% N_nodes .... Número de nós generalizados: nós (Junctions) + Reservoirs (RNF) + Tanks (RNV).

% node_name (i,1) .... Vector com as designações dos nós a que os padrões de consumo estão associados. (i=1:N_nodes).

% N_Pattern .... Contador de padrões temporais (consumos, preços, etc.).

% N_pattern_tstep .... Número de incrementos temporais (time step) do padrão de consumo.

% N_periodos .... Variável para registar o número de períodos de tarifário de energia existentes.

% N_Pipes .... Contador do número de condutas (Pipes) c/ ou s/ Check Valve.

% N_Pumps .... Contador do número de Grupos Elevatórios (GE).

% N_Reservs .... Contador do número de Reservoirs (RNF).

% N_ResTanks .... Contador do número de Reservoirs (RNF) + Tanks (RNV).

% N_Tanks .... Contador do número de Tanks (RNV).

% N_Valves .... Contador do número de válvulas (Valves).

% num_bombas_periodo (i,1) . Matriz coluna para registar o número de bombas necessárias em cada período (i=1:N_periodos)

% output_file .... Variável com o nome global do problema e extensão "out"; define o nome do ficheiro binário de "output" (extensão "out").

% P_B (i,1) .... Matriz coluna com a potência acumulada dos GE's. (i=1:N_Pumps).

% perc_utilizacao (i,1) .... Matriz coluna para registar a percentagem de utilização da bomba i durante o periodo de análise. (i=1:N_Pumps)

% perc_util_periodo (i,n) ....Matriz para registar a percentagem de utilização da bomba n durante o periodo i. (i=1:N_periodos e n=1:N_Pumps)

% Pump_name(i,1) .... Vector com as designações dos GE's lidas no ficheiro 'nome_do_problema.INP';(i=1:N_Pumps).

% Q_B (i,1) .... Vector com o caudal acumulado de cada GE. (i=1:N_Pumps).

% Q_elevar (i,1) .... Matriz coluna para registar os caudais necessários elevar em cada hora. (i=1:N_pattern_tstep).

% rend (i,1) .... Matriz coluna para registar o rendimento das bombas. (i=1:N_Pumps)

% report_file .... Variável com o nome global do problema e extensão "rep"; define o nome do ficheiro com o "report" da resolução (extensão "rep").

% Tank_name (i,1) .... Matriz coluna com a designação do "Tank" de ordem 'nt'. (i=1:N_Tanks).

% time_duration .... Variável com a duração (em segundos) da simulação do comportamento da instalação pelo Epanet.

% time_step_hyd .... Variável com o incremento de tempo (em segundos) da simulação hidráulica pelo Epanet.

% time_step_pattern .... Variável com a duração (em segundos) do incremento temporal dos padrões temporais (de consumos, preços, etc.).

% tline .... Variável auxiliar para onde é transferida cada linha do ficheiro de dados que está a ser lido.

% tstep .... Variável com o incremento de tempo efectivo (em segundos) da simulação hidráulica pelo Epanet.

% tstep_hid_horas .... Variável com o incremento de tempo (em horas) da simulação hidráulica pelo Epanet.

% tstep_hid_minutos .... Variável com o incremento de tempo (em minutos) da simulação hidráulica pelo Epanet.

% tstep_padrao_horas .... Variável com a duração (em horas) do incremento temporal dos padrões temporais (de consumos, preços, etc.).

% tstep_padrao_minutos ..... Variável com a duração (em minutos) do incremento temporal dos padrões temporais (de consumos, preços, etc.).

% V_agua_reserv (i,1) ...... Matriz para registar o volume de água em cada instante i. (i=1:N_pattern_tstep)

```
% V_cons_cap_max (i,1) ..... MAtriz coluna para registar o volume horário acumulado somado à
capacidade máxima do reservatório. (i=1:N_pattern_tstep).

% V_cons_cap_min (i,1) ..... MAtriz coluna para registar o volume horário acumulado somado à
capacidade mínima do  reservatório. (i=1:N_pattern_tstep).

% V_cons_periodo (i,1) ..... Matriz coluna para registar o volume consumido em cada periodo.
(i=1:N_periodos)

% V_elev_acum_i (i,1) ...... MAtriz coluna com a solução inicial do volume elevado.
(i=1:N_pattern_tstep).

% V_elev_periodo (i,1) ..... Matriz coluna para registar o volume necessário elevar em cada período.
 (i=1:N_periodos)

% V_horario (i,1) .......... Matriz para registar o volume horário consumido. (i=1:N_pattern_tstep).

% V_horario_acum (i,1) ..... Matriz para registar o volume horário  consumido
acumulado.(i=1:N_pattern_tstep).

% V_horario_elevar (i,1) ... Matriz coluna para registar o volume horário a elevar.
(i=1:N_pattern_tstep).

% volume_max_i (i,1) ....... Volume máximo admissível do "Tank" de ordem nt. (i=1:N_Tanks).

% vol_max ................. Soma do volume máximo dos n "Tanks".

% volume_min_i (i,1) ....... Volume mínimo admissível do "Tank" de ordem nt. (i=1:N_Tanks).

% vol_min ................. Soma do volume mínimo dos n "Tanks".
%
% FIM da identificação das VARIÁVEIS utilizadas.
%
++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++
% Procedimentos iniciais

clear all;             % Limpar da memória todas as variáveis.

fclose('all');         % Fechar todos os ficheiros que possam ter ficado
                       % abertos.

tic;                   % Início da contagem do tempo para eventual
                       % acompanhamento da execução do algoritmo.

echo off;              % Desligar o "report" de ecrã do Matlab.

clc;                   % Limpar o ecrã.

error_code = 0;        % Iniciar a variável auxiliar de "output" das
                       % diversas funções; não era necessário iniciar...
% ......................................................................

% ......................................................................
```

```
% Abertura do EPANET

estado = 1;          % O parâmetro "1" faz com que a função "ENepanet"
                     % efectue o carregamento da biblioteca de funções
                     % 'epanet2'.

error_code = ENepanet(estado); % "error_code" recebe a acção de resposta
                               % da função 'ENepanet'; ver definição
                               % detalhada em 'ENepanet.m'.

ENvariaveis_globais_12_v01; % Carregamento/descarregamento das variáveis
                            % globais da biblioteca, por 'script' de
                            % estado = [ 0 | 1 ].
% Declaração de Variáveis Globais adicionais
global N_Pumps  N_pattern_tstep K K1  K2  V_horario...
      diametro_eq  N_periodos  horas_periodo  hi_hf_c  time_duration;

global V_horario_elevar   Q_elevar  Q_B  P_B V_horario_acum  V_agua_reserv...
    h_agua_reserv  V_elev_periodo  num_bombas_periodo alfa_periodo  ...
    energia_periodo   custo_bomba_periodo  perc_util_periodo...
    custo_total_bomba  perc_utilizacao  custo_total_periodo...
    V_cons_periodo  h_agua_periodo;

% Fim da abertura do EPANET
% .......................................................................
% .......................................................................
% Entrada de dados e definições de ficheiros

fprintf(1,'PROGRAMA epanet_import_cpp\n');
fprintf(1,'\n');

flnam_global = input('Nome do problema? ','s');

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'..........................................................\n');
fprintf(1,'ESTAÇÃO ELEVATÓRIA\n');
fprintf(1,'Cálculo do consumo de energia e do respectivo custo\n');
fprintf(1,'Nome do problema: %s\n',flnam_global);
fprintf(1,'\n');

% Concatenar o nome do problema com as extensões "inp", "rep", "out" e
% "hyd".

input_file  = strcat(flnam_global,'.inp');
report_file = strcat(flnam_global,'.rep');
output_file = strcat(flnam_global,'.out');
hyd_file = strcat(flnam_global,'.hyd');

% Fim da entrada de dados e definições de ficheiros
% .......................................................................
% .......................................................................
% Carregar o problema e verificar as unidades de caudal:
```

```
% Comunicar ao Toolkit do EPANET o nome do ficheiro com a definição da
% instalação (extensão "inp"), o nome do ficheiro para escrever o "report"
% da resolução (extensão "rep") e o nome do ficheiro binário de "output"
% (extensão "out")

ENopen(input_file,report_file,output_file);

% Verificação das unidades a utilizar na simulação. Se o caudal não estiver
% em Litros/Segundo (LPS) termina a execução do programa.

if ( ENgetflowunits ~= EN_LPS ),
   error('Caudais não estão em L/s *** CORRIGIR ***');
else
   disp('Caudal em Litros/Segundo: OK!');
   disp(' ');
end;

% Problema carregado (e unidades de caudal verificadas)
% ......................................................................
% ......................................................................
% Abertura dos ficheiros 'nome_do_problema_inicial.INP' e
% 'nome_do_problema_final.INP' com as configurações inicial e final da
% instalação simulada (geometria, consumos, padrões, etc.).

inicial_file = strcat(flnam_global,'_inicial.inp');
final_file = strcat(flnam_global,'_final.inp');

% Gravar no ficheiro 'flnam_global'_inicial.inp a configuração inicial da
% instalação elevatória a simular (geometria, consumos, padrões, etc.)

ENsaveinpfile(inicial_file);

% ......................................................................
% ......................................................................
% Contagem de componentes da rede a simular
% (número de nós, tubos, reservatórios, válvulas, bombas, etc.)

N_nodes = ENgetcount(EN_NODECOUNT);    % contagem do número de nós
                                       % generalizados: nós (Junctions) +
                                       % Reservoirs (RNF) + Tanks (RNV)

N_links = ENgetcount(EN_LINKCOUNT);    % contagem do número de "links":
                                       % condutas (Pipes) + condutas c/
                                       % válvulas de retenção (CV: Check
                                       % Valve) + válvulas (Valves) +
                                       % bombas (Pumps).

% Contagem do número de nós (Junctions)

N_ResTanks = ENgetcount(EN_TANKCOUNT); % contagem do número de
                                       % Reservoirs (RNF) + Tanks (RNV)

N_Junctions = N_nodes - N_ResTanks;    % número de nós (Junctions)
```

```
% Contagem do número de reservatórios de nível fixo (Reservoirs) e de nível
% variável (Tanks)

N_Reservs = 0;           % Iniciar o contador de "Reservoirs"
N_Tanks = 0;             % Iniciar o contador de "Tanks"
N_Junctions_1 = 0;         % Iniciar o contador de "Junctions"; serve
                     % apenas para confirmar a contagem de
                     % "Junctions"

for in = 1:N_nodes

   if (ENgetnodetype(in) == EN_RESERVOIR)

      N_Reservs = N_Reservs + 1;

   elseif (ENgetnodetype(in) == EN_TANK)

      N_Tanks = N_Tanks + 1;

   else

      N_Junctions_1 = N_Junctions_1 + 1;

   end

end

% Verificação da contagem de "Junctions"

if ( N_Junctions_1 == N_Junctions )
   disp(' ');
   disp('Verificação da contagem de nós (Junctions): OK!');
   disp(' ');
else
   error('ERRO na contagem de nós (Junctions)!');
end


% Contagem do número de condutas (Pipes) c/ ou s/ "Check Valve", do número
% de válvulas e do número de bombas

N_Pipes = 0;             % Iniciar o contador de condutas (pipes).
N_Valves = 0;             % Iniciar o contador de válvulas.
N_Pumps = 0;              % Iniciar o contador de bombas.

for i = 1:N_links

   if (ENgetlinktype(i) == EN_CVPIPE || ENgetlinktype(i) == EN_PIPE)

      N_Pipes = N_Pipes + 1;
```

```
    elseif (ENgetlinktype(i) == EN_PRV || ENgetlinktype(i) == EN_PSV || ...
        ENgetlinktype(i) == EN_PBV || ENgetlinktype(i) == EN_FCV || ...
        ENgetlinktype(i) == EN_TCV || ENgetlinktype(i) == EN_GPV)

      N_Valves = N_Valves + 1;

    elseif (ENgetlinktype(i) == EN_PUMP)

      N_Pumps = N_Pumps + 1;

    end

end

% Determinação e armazenamento na matriz (coluna) 'ii_to_np' do index do
% "link" correspondente ao GE de ordem 'np'.

ii_to_np = zeros(N_Pumps,1); % Iniciar a matriz (coluna) que armazena o
                             % index do "link" correspondente a cada GE.

np = 0;                        % Iniciar o contador do número de ordem de
                             % cada GE.

Pump_name = cell(N_Pumps,1); % ("creating a cell array").

for i = 1:N_links

    if (ENgetlinktype(i) == EN_PUMP)

        np = np + 1;
        ii_to_np(np,1) = i;

        % Passar a designação do Grupo Elevatório (GE) para a matriz com as
        % designações ("cell array").

        tline = ENgetlinkid(i);
        Pump_name(np,1) = {sscanf(tline,'%s',[1,inf])};

    end

end

% Determinação e armazenamento na matriz (coluna) 'ii_to_nt' do index do
% "node" correspondente ao Tank de ordem 'nt'.

ii_to_nt = zeros(N_Tanks,1); % Iniciar a matriz (coluna) que armazena o
                             % index do "node" correspondente a cada Tank.

nt = 0;                        % Iniciar o contador do número de ordem de
                             % cada Tank.


for i = 1:N_nodes
```

```
    if (ENgetnodetype(i) == EN_TANK)

        nt = nt + 1;
        ii_to_nt(nt,1) = i;


    end

end

% Determinação e armazenamento na matriz (coluna) 'ii_to_nd' do index do
% "node" correspondente ao nó com o padrão de consumo.

nd = 0;                  % Iniciar o contador do número de ordem de
                         % cada nó.

node_name = cell(N_Junctions,1); % ("creating a cell array").


for i = 1:N_nodes

    if (ENgetnodevalue(i,EN_BASEDEMAND) > 0)

        nd=nd+1;
        ii_to_nd = i;

        % Passar a designação do Tank para a matriz com as
        % designações ("cell array").

        tline = ENgetnodeid(i);
        node_name (nd,1) = {sscanf(tline,'%s',[1,inf])};

    end

end


% Envio de informação para o monitor

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'..........................................................\n');
fprintf(1,'Contagem de componentes da rede a calibrar\n');
fprintf(1,'\n');

fprintf(1,'Número de nós generalizados (Nodes): %g\n',N_nodes);
fprintf(1,'Número de nós (Junctions): %g\n',N_Junctions);
fprintf(1,'Número de Reservoirs (RNF): %g\n',N_Reservs);
fprintf(1,'Número de Tanks (RNV): %g\n',N_Tanks);
fprintf(1,'\n');

fprintf(1,'Número de "links": %g\n',N_links);
fprintf(1,'Número de condutas (Pipes) (c/ ou s/ CV): %g\n',N_Pipes);
```

```
fprintf(1,'Número de válvulas (Valves): %g\n',N_Valves);
fprintf(1,'Número de grupos elevatórios (Pumps): %g\n',N_Pumps);
fprintf(1,'\n');

% Fim da contagem de componentes da rede a simular
% .......................................................................


% .......................................................................
% Contagem de padrões temporais (consumos, preços, etc.), de curvas (CCB's,
% CCR's, etc) e de controlos simples

N_Pattern = ENgetcount(EN_PATCOUNT);
N_Curve = ENgetcount(EN_CURVECOUNT);
N_Control = ENgetcount(EN_CONTROLCOUNT);

% Envio de informação para o monitor

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'..........................................................\n');
fprintf(1,'Contagem de padrões temporais, curvas e controlos\n');
fprintf(1,'\n');

fprintf(1,'Número de padrões temporais (consumos, preços, etc.): %g\n',...
   N_Pattern);
fprintf(1,'Número de curvas (CCBs, CCRs, etc.): %g\n',N_Curve);
fprintf(1,'Número de controlos simples: %g\n',N_Control);
fprintf(1,'\n');


% Determinação e armazenamento na variável index_energia do index do padrão
% de energia
npt=0;
for i=1:N_Pattern
   if(ENgetpatternid(i)=='P_E')
      npt=npt+1;
      index_energia(npt,1)=i;
   end
end

% Determinação e armazenamento na variável index_consumo do index do padrão
% de consumo
npt=0;
for i=1:N_Pattern
   if(ENgetpatternid(i)=='P_C')
      npt=npt+1;
      index_consumo(npt,1)=i;
   end
end

% .......................................................................
% Outras informações para controlo (durante o desenvolvimento do
% programa...):
```

```
% Ler o tempo da simulação

time_duration = ENgettimeparam(EN_DURATION);
duracao_horas = time_duration/3600;

% Ler o "time step" da simulação hidráulica

time_step_hyd = ENgettimeparam(EN_HYDSTEP);
tstep_hid_horas = time_step_hyd/3600;
tstep_hid_minutos = time_step_hyd/60;

%   Ler o número de "time step's" do padrão de consumo do index_consumo

    N_pattern_tstep = ENgetpatternlen(index_consumo);

% Ler o "time step" do padrão de consumo (em segundos)

time_step_pattern = ENgettimeparam(EN_PATTERNSTEP);
tstep_padrao_horas = time_step_pattern/3600;
tstep_padrao_minutos = time_step_pattern/60;


fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'.......................................................\n');
fprintf(1,'Outras informações:\n');
fprintf(1,'\n');

fprintf(1,'Duração da simulação: %g hora(s)\n',duracao_horas);
fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'"Time step" do cálculo hidráulico: %g hora(s)\n', ...
    tstep_hid_horas);
fprintf(1,'"Time step" do cálculo hidráulico: %g minuto(s)\n', ...
    tstep_hid_minutos);
fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'Número de passos dos padrões temporais: %d\n',N_pattern_tstep);
fprintf(1,'"Time step" do padrao de consumo: %g hora(s)\n', ...
    tstep_padrao_horas);
fprintf(1,'"Time step" do padrao de consumo: %g minuto(s)\n', ...
    tstep_padrao_minutos);

%   .......................................................................

% Cálculo da altura máxima e mínima de cada Reservatório



fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'...........................................................\n');
fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'Introdução da altura máxima e mínima de água admissível em cada célula\n');
fprintf(1,'\n');
quest=input('As células são iguais(Sim > 1; Não > 0)?');
```

```
if (quest==1)
   fprintf(1,'\n');
   h_max=input('Qual a altura máxima de água (em metros)?');
   fprintf(1,'\n');
   h_min=input('Qual a altura mínima de água (em metros)?');
   fprintf(1,'\n');
   diametro=input('Qual o diâmetro (em metros)?');
   fprintf(1,'.........................................................\n');
   fprintf(1,'\n');

   vol_max=((pi()*diametro^2*h_max)/4)*N_Tanks;
   vol_min=((pi()*diametro^2*h_min)/4)*N_Tanks;
end

if (quest==0)

   h_max=zeros(N_Tanks,1);
   h_min=zeros(N_Tanks,1);
   diametro=zeros(N_Tanks,1);

for nt=1:N_Tanks

fprintf(1,'Célula %g', nt);
fprintf(1,'\n');
h_max(nt,1)=input('Qual a altura máxima de água (em metros)?');
fprintf(1,'\n');
h_min(nt,1)=input('Qual a altura mínima de água (em metros)?');
fprintf(1,'\n');
diametro(nt,1)=input('Qual o diâmetro (em metros)?');
fprintf(1,'.........................................................\n');
fprintf(1,'\n');
end


volume_max_i=zeros(N_Tanks,1);

volume_min_i=zeros(N_Tanks,1);

for nt=1:N_Tanks

   volume_max_i(nt,1)=(pi()*diametro(nt,1)^2*h_max(nt,1))/4;

   volume_min_i(nt,1)=(pi()*diametro(nt,1)^2*h_min(nt,1))/4;

end

vol_max=sum(volume_max_i);
vol_min=sum(volume_min_i);
end


diametro_eq=sqrt(4*vol_max/(pi()*h_max));
```

```
% Actualização na rede dos níveis máximos e mínimos de água no
% reservatório e definição da altura da água inicial nos reservatórios - igual à altura
% mínima


for nt=1:N_Tanks
    it=ii_to_nt(nt,1);
    ENsetnodevalue(it,EN_TANKLEVEL,h_min);
    ENsetnodevalue(it,EN_MINLEVEL,h_min);
    ENsetnodevalue(it,EN_MAXLEVEL,h_max);
end


% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
% Início da simulação hidráulica para obtenção dos caudais, potência e
% altura manométrica dos GE's

fprintf(1,'\n');
 fprintf(1,'Início da Simulação Hidráulica para Obtenção dos Caudais e Potência das bombas''\n');
 fprintf(1,'.........................................................\n');
 fprintf(1,'\n');
 for np=1:N_Pumps
    ip=ii_to_np(np,1);
    ENsetlinkvalue(ip,EN_INITSTATUS,0);
end


for np=1:N_Pumps

    ip=ii_to_np(np,1);
    ENsetlinkvalue(ip,EN_INITSTATUS,1);

    ENsolveH;

    Q_B(np,1)=ENgetlinkvalue(ip,EN_FLOW)*np/1000;
    P_B(np,1)=ENgetlinkvalue(ip,EN_ENERGY)*np;
    H_B(np,1)=ENgetlinkvalue(ip,EN_HEADLOSS);

end

% Cálculo do Rendimento dos GE's

for np=1:N_Pumps
    rend(np,1)=(9.8*(Q_B(np,1)/np)*H_B(np,1)/(P_B(np,1)/np))*(-1)*100;
end

fprintf(1,'\n');
 fprintf(1,'Final da Simulação Hidráulica para Obtenção dos Caudais e Potência das bombas''\n');
 fprintf(1,'.........................................................\n');
 fprintf(1,'\n');
```

```
% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
% Leitura do tarifário de energia presente no ficheiro 'tarifario_verao.txt' ou
% 'tarifario_inverno.txt'

fprintf(1,'\n');
fprintf(1,'.........................................................\n');
fprintf(1,'\n');
quest_tarif=input('Qual o tarifário de electricidade a utilizar (Verão>1;Inverno>0)?');

if (quest_tarif==1)
   fl_tarifario='tarifario_verao.txt';
   ftar=fopen(fl_tarifario,'rt');
elseif (quest_tarif==0)
   fl_tarifario='tarifario_inverno.txt';
   ftar=fopen(fl_tarifario,'rt');
end

   cabecalho=fgetl(ftar);            %leitura do cabeçalho
   cabecalho=fgetl(ftar);            %leitura do cabeçalho

   % Leitura do número de períodos de tarifários existentes no ficheiro
   % tarifario_verao.txt

   tline = fgetl(ftar);              % Leitura da linha.
   formato = '%d';                   % Definição do formato da informação
                                     % contida na linha.
   dados = sscanf(tline,formato);    % Transferência da informação numérica
                                     % contida na linha para o vector
                                     % auxiliar "dados".
   N_periodos = dados(1);            % Passagem da informação do vector
                                     % "dados" para a variável definitiva.
   clear dados                       % Apagar o vector auxiliar "dados".

   % Leitura da hora inicial, hora final e custo da energia para cada
   % período tarifário

   cabecalho = fgetl(ftar);          % Leitura do cabeçalho.

   % Definição do formato da informação

   ndados = 2;
   formato = '%g';
   for idados = 2:ndados
      formato = strcat(formato,' %g');
   end

   hi_hf_c = zeros(N_periodos,3);    % Iniciar com ZEROS a matriz
                                     % hi_hf_c(N_periodos,3)

   % Leitura dos dados

   for nd = 1:N_periodos
      tline = fgetl(ftar);
```

```
        hi_hf_c(nd,:) = sscanf(tline,formato);
    end

    % Envio da informação para o monitor

    s = sprintf('Número de Períodos: %f',N_periodos);
    disp(s);

    s = sprintf(' Hora Inicial    Hora Final    Custo (€/kWh)');
    disp(s);

    for nd = 1:N_periodos
        count = fprintf(1,'%7.0f        %7.0f          %7.4f\n',hi_hf_c(nd,:));
    end
    disp(' ');

% :::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
% Gravar para uma nova variável o custo unitário horário da energia e o
% número de horas de cada período tarifário

horas_periodo=zeros(N_periodos,1);
for n=1:N_periodos
    horas_periodo(n,1)=hi_hf_c(n,2)-hi_hf_c(n,1);
end

tarifario=zeros(24,1);
i=0;
for nd=1:N_periodos
    i=i+horas_periodo(nd,1);
    b=i-horas_periodo(nd,1)+1;
    for a=b:i
        tarifario(a,1)=hi_hf_c(nd,3);
    end
end

for n=1:24
ENsetpatternvalue(index_energia,n,tarifario(n,1));
end

i=0;
hora_final_periodo=zeros(N_periodos,1);
for n=1:N_periodos
    i=i+horas_periodo(n,1);
    hora_final_periodo(n)=i;
end



% :::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
% Correr a simulação hidráulica completa.
fprintf(1,'\n');
 fprintf(1,'Início da Simulação Hidráulica para Obtenção dos Consumos Horários\n');
 fprintf(1,'.........................................................\n');
```

```
 fprintf(1,'\n');
% Iniciar matrizes para registar o tempo de operação de cada GE, a energia
% consumida por cada GE e o respectivo custo.

K=60;    % segundos(de um minuto)

consumo=zeros(N_pattern_tstep+1,1);



consumo(1,1)=0;
consumo(2,1)=ENgetnodevalue(ii_to_nd,EN_BASEDEMAND)*...
   ENgetpatternvalue(index_consumo,1);

ENopenH;              % "Opens the hydraulics analysis system".

ENinitH(1);           % "Initializes storage tank levels, link status and
                % settings, and the simulation clock time prior to
                % running a hydraulic analysis"; o "saveflag" igual
                % a 1 para gravar os resultados da simulação
                % hidráulica (para não gravar colocar 0).

tstep = time_step_hyd;  % Iniciar esta variável com um valor positivo para
                % permitir a primeira execução do ciclo "while".


while ( tstep > 0 )

   time = ENrunH;

    for n = 3:N_pattern_tstep+1

      if (time==time_step_pattern*(n-2))
         consumo(n,1)=ENgetnodevalue(ii_to_nd,EN_DEMAND); % l/s


      end
    end



   tstep = ENnextH;

end



% Fechar a simulação e gravar os ficheiros de "output" (extensão "out") e
% de "report" (extensão "rep") da resolução.

ENcloseH;             % "Closes the hydraulic analysis system, freeing
                % all allocated memory".
```

```
ENsaveH;            % "Transfers results of a hydraulic simulation from
                    % the binary Hydraulics file to the binary Output
                    % file, where results are only reported at uniform
                    % reporting intervals".


% FIM da simulação hidráulica completa.

V_horario=zeros(N_pattern_tstep+1,1);

V_horario_acum=zeros(N_pattern_tstep+1,1);

V_cons_cap_min=zeros(N_pattern_tstep+1,1);

V_cons_cap_max=zeros(N_pattern_tstep+1,1);

V_elev_acum_i=zeros(N_pattern_tstep+1,1);

V_horario_acum(1,1)=0;

V_cons_cap_min(1,1)=V_horario_acum(1,1)+vol_min/K;

V_cons_cap_max(1,1)=V_horario_acum(1,1)+vol_max/K;

V_elev_acum_i(1,1)=(V_cons_cap_min(1,1)+V_cons_cap_max(1,1))/2;

V_horario(N_pattern_tstep,1)=consumo(N_pattern_tstep,1)*3.6/K;


for n=2:N_pattern_tstep+1

   V_horario(n,1)=consumo(n,1)*3.6/K;

   V_horario_acum(n,1)=V_horario_acum(n-1,1) + V_horario(n,1); % m3/K

   V_cons_cap_min(n,1)=V_horario_acum(n,1)+vol_min/K; %m3/K

   V_cons_cap_max(n,1)=V_horario_acum(n,1)+vol_max/K; %m3/K

   V_elev_acum_i(n,1)=(V_cons_cap_min(n,1)+V_cons_cap_max(n,1))/2; %m3/K

end

% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
% Definição do estado inicial das bombas - deixa-se uma bomba ligada.

Ensetlinkvalue(ii_to_np(1,1),EN_INITSTATUS,1);

for np=2:N_Pumps
   ip=ii_to_np(np,1);
   Ensetlinkvalue(ip,EN_INITSTATUS,0);
```

```
end


% Introdução das regras simples de operação
i=0;
  for np=1:N_Pumps
    ip=ii_to_np(np,1);
    it=ii_to_nt(1,1);
    i=i+1;
    setting_1 = 1;
    ENsetcontrol(i,EN_LOWLEVEL,ip,setting_1,it,h_min(1,1));
    i=i+1;
    setting_0 = 0;
    ENsetcontrol(i,EN_HILEVEL,ip,setting_0,it,h_max(1,1));
  end

% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
% Início do Cálculo da função objectivo


% Definição das restrições de igualdade


if (quest_tarif==1)
    A_eq=zeros(3,N_pattern_tstep+1);
    b_eq=zeros(3,1);

    A_eq(1,1)=-1;
    A_eq(1,N_pattern_tstep+1)=1;
    A_eq(2,10)=1;
    A_eq(3,13)=1;

    b_eq(1,1)=V_cons_cap_max(N_pattern_tstep+1,1)-V_cons_cap_max(1,1);
    b_eq(2,1)=V_cons_cap_max(10,1);
    b_eq(3,1)=V_cons_cap_min(13,1);

elseif (quest_tarif==0)
    A_eq=zeros(5,N_pattern_tstep+1);
    b_eq=zeros(5,1);

    A_eq(1,1)=-1;
    A_eq(1,N_pattern_tstep+1)=1;
    A_eq(2,10)=1;
    A_eq(3,13)=1;
    A_eq(4,19)=1;
    A_eq(5,22)=1;

    b_eq(1,1)=V_cons_cap_max(N_pattern_tstep+1,1)-V_cons_cap_max(1,1);
    b_eq(2,1)=V_cons_cap_max(10,1);
    b_eq(3,1)=V_cons_cap_min(13,1);
    b_eq(4,1)=V_cons_cap_max(19,1);
    b_eq(5,1)=V_cons_cap_min(22,1);
end
```

```
% Definição por parte do operador do valor dos coeficientes K1 e K2
% correspondentes ao peso a dar ao comprimento e ao custo.

 fprintf(1,'A função objectivo é calculada através de F=K1*"regularização do caudal"+K2*"custo da
energia"\n');
 fprintf(1,'.......................................................\n');
 fprintf(1,'\n');
 K1 =input('Valor para o coeficiente K1? ');
 fprintf(1,'\n');
 K2 =input('Valor para o coeficiente K2? ');
 fprintf(1,'\n');

%   Definição de algumas opções do algoritmo de optimização.


    options_1 = optimset('LargeScale','off','Algorithm','active-set', ...
                     'Diagnostics','on','Display','iter', ...
                     'DiffMaxChange',1.0e-02, ...
                     'DiffMinChange',1.0e-05, ...
                     'MaxIter',1000,'MaxFunEvals',10000, ...
                     'TolFun',1.0e-6,'TolCon',1.0e-6, ...
                     'TolConSQP',1.0e-6,'TolX',1e-6);

%
    value_TolX = optimget (options_1,'TolX');
    value_TolFun = optimget (options_1,'TolFun');
    value_TolCon = optimget (options_1,'TolCon');
    value_TolConSQP = optimget (options_1,'TolConSQP');

    %

    fprintf(1,'\n');
    fprintf(1,'AGUARDAR, enquanto a FMINCON procura uma solução!\n');
    fprintf(1,'\n');

    [V_elev_acum,f_objectivo,exitflag,output,lambda,grad,hessian] = ...
        fmincon(@F1_obj_ee_vfinal_2,V_elev_acum_i,[],[],A_eq,b_eq, ...
        V_cons_cap_min,V_cons_cap_max,[],options_1);

% Envio dos Resultados finais para o monitor
    fprintf(1,'\n');
    fprintf(1,'A solução que minimiza a função objectivo já foi encontrada.\n');
    fprintf(1,'\n');


tempo=toc/60;
```

```
% Envio dos Resultados finais para o monitor



    fprintf(1,'\n');
    fprintf(1,'Fim da minimização de arranques e paragens dos GEs.\n');
    fprintf(1,'\n');
    fprintf(1,'\n');
    fprintf(1,'Tempo decorrido: %g minutos\n',tempo);
    fprintf(1,'\n');
    fprintf(1,'Resultados:\n');
    fprintf(1,'\n');

altura_agua=zeros(N_periodos,3);

altura_agua(1:N_periodos,1)=1:N_periodos;
altura_agua(1,2)=h_min;
altura_agua(2:N_periodos,2)=h_agua_periodo(1:(N_periodos-1),1);
altura_agua(1:N_periodos,3)=h_agua_periodo(1:N_periodos,1);



 resultado_final=zeros(N_Pumps,4);

for np=1:N_Pumps

    resultado_final(np,1)=np;
    resultado_final(np,2)=perc_utilizacao(np,1);
    resultado_final(np,3)=rend(np,1);
    resultado_final(np,4)=custo_total_bomba(np,1);
end

periodos=zeros(N_periodos,4);


    periodos(1:N_periodos,1)=1:N_periodos;
    periodos(1:N_periodos,2)=hi_hf_c(1:N_periodos,1);
    periodos(1:N_periodos,3)=hi_hf_c(1:N_periodos,2);
    periodos(1:N_periodos,4)=num_bombas_periodo(1:N_periodos,1);

utilizacao=zeros(N_periodos,N_Pumps + 1);

    utilizacao(1:N_periodos,1)=1:N_periodos;
    for np=2:N_Pumps+1
    utilizacao(1:N_periodos,np)=perc_util_periodo(1:N_periodos,np-1);
    end


pause on

 fprintf(1,'\n');
    fprintf(1,'Número de bombas utilizadas em cada período\n');
    fprintf(1,'\n');
```

```
 s=sprintf('Período   Hora Início    Hora Fim      Número   ');
 disp(s);
 s=sprintf('                                  de Bombas');
 disp(s);
 s=sprintf('____________________________________________________________________________');
    disp(s);

for n = 1:N_periodos
count = fprintf(1,'   %1.0f          %1.0f            %1.0f           %1.0f\n',periodos(n,:));
end
disp(' ');
s=sprintf('____________________________________________________________________________');
    disp(s);
quest_pause_3=input('Prima "1" para continuar: ');
    fprintf(1,'........................................................\n');
    if (quest_pause_3==1)
        pause off
    end



    pause on

 fprintf(1,'\n');
    fprintf(1,'Factor de Utilização das Bombas em cada Período\n');
    fprintf(1,'\n');
 s=sprintf('Período             Factor de  ');
 disp(s);
 s=sprintf('                  Utilização(%)');
 disp(s);
 s=sprintf('_____________________________________________');
 disp(s);
 s=sprintf('                  B1          B2          B3');
 disp(s);
 s=sprintf('_____________________________________________');
 disp(s);
for n = 1:N_periodos
count = fprintf(1,'  %1.0f            %2.4f     %2.4f    %2.4f\n',utilizacao(n,:));
end
disp(' ');
s=sprintf('____________________________________________________________________________');
    disp(s);
quest_pause_4=input('Prima "1" para continuar: ');
    fprintf(1,'........................................................\n');
    if (quest_pause_4==1)
        pause off
    end
    pause on

 fprintf(1,'\n');
    fprintf(1,'Número de bombas utilizadas em cada período\n');
    fprintf(1,'\n');
 s=sprintf('Período   Nível de Água Inicial (m)    Nível de Água Final (m)');
```

```
 disp(s);
 s=sprintf('____________________________________________________________');
   disp(s);

for n = 1:N_periodos
count = fprintf(1,'   %1.0f           %1.3f                %1.3f\n',altura_agua(n,:));
end
disp(' ');
s=sprintf('_________________________________________________________________');
   disp(s);
quest_pause_5=input('Prima "1" para continuar: ');
   fprintf(1,'.......................................................\n');
   if (quest_pause_5==1)
       pause off
   end

   pause on

 fprintf(1,'\n');
   fprintf(1,'Resultados obtidos para o custo da energia\n');
   fprintf(1,'\n');

s = sprintf(' Bomba    Factor de Utilização   Rendimento      Custo     ');
   disp(s);

s = sprintf('          (percentagem)      (percentagem)     (€)      ');
   disp(s);
s = sprintf('_________________________________________________________');
   disp(s);

for np = 1:N_Pumps
count = fprintf(1,'%2.0f          %2.2f         %2.1f         %2.2f\n',resultado_final(np,:));
end
disp(' ');
s =
sprintf('_________________________________________________________________________
_');
   disp(s);
s = sprintf('                CUSTO TOTAL     %4.2f    ',custo_total_periodo);
   disp(s);
s =
sprintf('_________________________________________________________________________
_');
   disp(s);

   quest_pause_6=input('Prima "1" para continuar: ');
   fprintf(1,'.......................................................\n');
   if (quest_pause_6==1)
       pause off
   end
% :::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
% Gravar no ficheiro 'flnam_global'_final.inp a configuração final da
% instalação elevatória simulada (geometria, consumos, etc.)
```

```
ENsaveinpfile(final_file);


% ......................................................................
% Encerramento do EPANET

fprintf(1,'\n');

estado = 0;          % O parâmetro "0" faz com que a função "ENepanet"
                     % descarregue a biblioteca de funções 'epanet2'.

error_code = ENepanet(estado); % "error_code" recebe a acção de resposta
                               % da função 'ENepanet'; ver definição
                               % detalhada em 'ENepanet.m'.

ENvariaveis_globais_12_v01; % Carregamento/descarregamento das variáveis
                            % globais da biblioteca, por 'script' de
                            % estado = [ 0 | 1 ].

% Fim do encerramento do EPANET
% ......................................................................

% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::

% Fechar ficheiros

fclose('all');        % Fechar todos os ficheiros que possam ter ficado
                      % abertos.

% FIM
```

B. PROGRAMA QUE CALCULA A FUNÇÃO OBJECTIVO

```
% ::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::
 function [f_objectivo] = F1_obj_ee_vfinal_2(V_elev_acum)

% """"""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""""
% Função (function) para o cálculo da Função Objectivo: somatório do
% "comprimento" e do custo da energia
%


% Declaração de Variáveis Globais adicionais

global N_Pumps  N_pattern_tstep K K1  K2  V_horario...
      diametro_eq  N_periodos  horas_periodo  hi_hf_c  time_duration;

global V_horario_elevar   Q_elevar  Q_B  P_B V_horario_acum  V_agua_reserv...
    h_agua_reserv  V_elev_periodo  num_bombas_periodo alfa_periodo  ...
    energia_periodo   custo_bomba_periodo  perc_util_periodo...
    custo_total_bomba  perc_utilizacao  custo_total_periodo...
```

```
    V_cons_periodo  h_agua_periodo;

% :::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::::

V_horario_elevar=zeros(N_pattern_tstep,1);

Q_elevar=zeros(N_pattern_tstep,1);

comprimento=zeros(N_pattern_tstep,1);

V_agua_reserv=zeros(N_pattern_tstep+1,1);

h_agua_reserv=zeros(N_pattern_tstep+1,1);

V_agua_reserv(1,1)=V_elev_acum(1,1)-V_horario_acum(1,1);

h_agua_reserv(1,1)=(V_agua_reserv(1,1)*K)*4/(pi()*(diametro_eq^2));


for n=2:N_pattern_tstep+1

    V_horario_elevar(n-1,1)=V_elev_acum(n,1)-V_elev_acum(n-1,1); %m3/K

    Q_elevar(n-1,1)=V_horario_elevar(n-1,1)/K;

    comprimento(n-1,1)=sqrt(V_horario_elevar(n-1,1)^2+K^2);

    V_agua_reserv(n,1)=V_elev_acum(n,1)-V_horario_acum(n,1);

    h_agua_reserv(n,1)=(V_agua_reserv(n,1)*K)*4/(pi()*(diametro_eq^2));

end

%Calcular o volume a elevar, o volume consumido e altura da água final para cada período

V_elev_periodo=zeros(N_periodos,1);

h_agua_periodo=zeros(N_periodos,1);

V_cons_periodo=zeros(N_periodos,1);

i=0;
for nd=1:N_periodos
    i=i+horas_periodo(nd,1);
    b=i-horas_periodo(nd,1)+1;

    V_elev_periodo(nd,1)=sum(V_horario_elevar(b:i,1))*K; %m3
    h_agua_periodo(nd,1)=h_agua_reserv(i+1,1);
```

```
    V_cons_periodo(nd,1)=sum(V_horario(b+1:i+1,1))*K;

end

% Calcular qual o volume máximo que cada combinação de GE's pode elevar em
% cada periodo tarifario

V_max_bombas_per=zeros(N_periodos,N_Pumps);

for nd=1:N_periodos
    for np=1:N_Pumps
    V_max_bombas_per(nd,np)=Q_B(np,1)*horas_periodo(nd,1)*3600;
    end
end

% Cálculo do número de bombas necessárias em cada período, tempo de
% funcionamento das mesmas e custo associado

num_bombas_periodo=zeros(N_periodos,1);
alfa_periodo=zeros(N_periodos,N_Pumps);
energia_periodo=zeros(N_periodos,N_Pumps);
custo_bomba_periodo=zeros(N_periodos,N_Pumps);
perc_util_periodo=zeros(N_periodos,N_Pumps);
V_elev_b_periodo=zeros(N_periodos,N_Pumps);

n_b_f=zeros((N_Pumps-1),1);
n_b_f(1,1)=1;

DT_periodo=zeros(N_periodos,N_Pumps);

for n=1:N_periodos

for np=2:N_Pumps

n_b_f(np,1)=np;

if (V_elev_periodo(n,1)>0 && V_elev_periodo(n,1)<=V_max_bombas_per(n,1))
        num_bombas_periodo(n,1)=1;

elseif (V_elev_periodo(n,1)>V_max_bombas_per(n,np-1) && ...
            V_elev_periodo(n,1)<=V_max_bombas_per(n,np))

            num_bombas_periodo(n,1)=n_b_f(np);


elseif (V_elev_periodo(n,1)<0)

            num_bombas_periodo(n,1)=0;

 end
 end

for np=2:N_Pumps
```

```
if  (num_bombas_periodo(n,1)==1)
   DT_periodo(n,1)=(V_elev_periodo(n,1)/Q_B(1,1));
   energia_periodo(n,1)=(P_B(1,1)*DT_periodo(n,1))/3600;
elseif (num_bombas_periodo(n,1)==np)
   DT_periodo(n,1)=horas_periodo(n,1)*3600;
   energia_periodo(n,1)=(P_B(np-1,1)*(DT_periodo(n,np-1)-DT_periodo(n,np))/(np-1)...
               +P_B(np,1)*DT_periodo(n,np)/np)/3600;
elseif (num_bombas_periodo(n,1)==0)
     DT_periodo(n,1)=0;
     energia_periodo(n,1)=0;
end

end
for i=2:N_Pumps
if(num_bombas_periodo(n,1)==i)
     for np=2:N_Pumps
       if (np==i)

            DT_periodo(n,np)=((V_elev_periodo(n,1)-Q_B(np-1,1)*(horas_periodo(n,1)*3600))...
               /(Q_B(np,1)-Q_B(np-1,1)));
            energia_periodo(n,np)=(P_B(np,1)*DT_periodo(n,np)/np)/3600;

         elseif(np>i)

            DT_periodo(n,np)=0;
            energia_periodo(n,np)=0;
         elseif (np<i)

            DT_periodo(n,np)=horas_periodo(n,1)*3600;
            energia_periodo(n,np)=((P_B(np-1,1)*(DT_periodo(n,np-1)-DT_periodo(n,np)))...
               /(np-1)+P_B(np,1)*DT_periodo(n,np)/np)/3600;
         end
       end
   end
end

for np=1:N_Pumps
custo_bomba_periodo(n,np)=energia_periodo(n,np)*hi_hf_c(n,3);
alfa_periodo(n,np)=DT_periodo(n,np)/(horas_periodo(n,1)*3600);

end

   if (num_bombas_periodo(n,1)==1)
   V_elev_b_periodo(n,1)=Q_B(1,1)*DT_periodo(n,1);

   end


   for i=2:N_Pumps
   if(num_bombas_periodo(n,1)==i)
      for np=2:N_Pumps
         if (np==i)
            V_elev_b_periodo(n,1)=Q_B(1,1)*(DT_periodo(n,1)-sum(DT_periodo(n,2:i)))+...
```

```
                Q_B(np,1)*DT_periodo(n,np)/np;
            V_elev_b_periodo(n,np)=Q_B(np,1)*DT_periodo(n,np)/np;


            elseif(np>i)
            V_elev_b_periodo(n,np)=0;
        elseif (np<i)
            V_elev_b_periodo(n,np)=Q_B(np,1)*(DT_periodo(n,np)-sum(DT_periodo(n,np:i)))+...
                Q_B(i,1)*DT_periodo(n,i)/i;
        end
      end
    end
    end


for np=1:N_Pumps

    perc_util_periodo(n,np)=(DT_periodo(n,np)/(horas_periodo(n,1)*3600))*100;

end
end



custo_total_bomba=sum(custo_bomba_periodo)';

perc_utilizacao=((sum(DT_periodo)./time_duration)*100)';
custo_total_periodo=sum(sum(custo_bomba_periodo));

% Cálculo da função objectivo


f_objectivo=K1*sum(comprimento)+K2*custo_total_periodo;


end
```

ANEXO D

CONTROLOS COM CONDIÇÕES MÚLTIPLAS UTILIZADOS PARA O DIA 08 DE JULHO DE 2008

Rule 10

if system clocktime >= 0:00

and system clocktime < 2:00

and tank ARADCE01 level >= 4.98

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 11

if system clocktime >= 0:00

and system clocktime < 2:00

and tank ARADCE01 level <= 2

then pump ETAB120 status is open

priority 10

Rule 12

if system clocktime >= 0:00

and system clocktime < 2:00

and tank ARADCE01 level >= 3.25

then pump ETAB141 status is closed

priority 10

Rule 13

if system clocktime >= 0:00

and system clocktime < 2:00

and tank ARADCE01 level < 2

then pump ETAB141 status is open

priority 10

Rule 20

if system clocktime >= 2:00

and system clocktime < 6:00

and tank ARADCE01 level >= 4.98

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 21

if system clocktime >= 2:00

and system clocktime < 6:00

and tank ARADCE01 level <= 2

then pump ETAB120 status is open

priority 10

Rule 22

if system clocktime >= 2:00

and system clocktime < 6:00

and tank ARADCE01 level >= 4.6

then pump ETAB141 status is closed

priority 10

Rule 23

if system clocktime >= 2:00

and system clocktime < 6:00

and tank ARADCE01 level <= 2.3

then pump ETAB141 status is open

priority 10

Rule 30

if system clocktime >= 6:00

and system clocktime < 7:00

and tank ARADCE01 level >= 4.98

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 31

if system clocktime >= 6:00

and system clocktime < 7:00

and tank ARADCE01 level <= 3.7

then pump ETAB120 status is open

priority 10

Rule 32

if system clocktime >= 6:00

and system clocktime < 7:00

and tank ARADCE01 level >= 4.98

then pump ETAB141 status is closed

priority 10

Rule 33

if system clocktime >= 6:00

and system clocktime < 7:00

and tank ARADCE01 level <= 2.0

then pump ETAB141 status is open

priority 10

priority 10

Rule 40

if system clocktime >= 7:00

and system clocktime < 9:00

and tank ARADCE01 level >= 4.98

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 41

if system clocktime >= 7:00

and system clocktime < 9:00

and tank ARADCE01 level <= 3.55

then pump ETAB120 status is open

priority 10

Rule 50

if system clocktime >= 9:00

and system clocktime < 12:00

and tank ARADCE01 level >= 3.11

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 51

if system clocktime >= 9:00

and system clocktime < 12:00

and tank ARADCE01 level <= 2.0

then pump ETAB120 status is open

priority 10

Rule 60

if system clocktime >= 12:00

and system clocktime < 23:59

and tank ARADCE01 level >= 3.635

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 61

if system clocktime >= 12:00

and system clocktime < 23:59

and tank ARADCE01 level <= 2.01

then pump ETAB120 status is open

priority 10

ANEXO E

CONTROLOS COM CONDIÇÕES MÚLTIPLAS UTILIZADOS PARA O DIA 08 DE JANEIRO DE 2008

Rule 10

if system clocktime >= 0:00

and system clocktime < 2:00

and tank ARADCE01 level >= 4.98

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 11

if system clocktime >= 0:00

and system clocktime < 2:00

and tank ARADCE01 level <= 2.2

then pump ETAB120 status is open

priority 10

Rule 12

if system clocktime >= 0:00

and system clocktime < 2:00

and tank ARADCE01 level >= 3.16

then pump ETAB141 status is closed

priority 10

Rule 13

if system clocktime >= 0:00

and system clocktime < 2:00

and tank ARADCE01 level < 2.01

then pump ETAB141 status is open

priority 10

Rule 20

if system clocktime >= 2:00

and system clocktime < 6:00

and tank ARADCE01 level >= 4.98

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 21

if system clocktime >= 2:00

and system clocktime < 6:00

and tank ARADCE01 level <= 2.5

then pump ETAB120 status is open

priority 10

Rule 22

if system clocktime >= 2:00

and system clocktime < 6:00

and tank ARADCE01 level >= 2.94

then pump ETAB141 status is closed

priority 10

Rule 23

if system clocktime >= 2:00

and system clocktime < 6:00

and tank ARADCE01 level <= 2.06

then pump ETAB141 status is open

priority 10

Rule 30

if system clocktime >= 6:00

and system clocktime < 7:00

and tank ARADCE01 level >= 4.98

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 31

if system clocktime >= 6:00

and system clocktime < 7:00

and tank ARADCE01 level <= 4.69

then pump ETAB120 status is open

priority 10

Rule 32

if system clocktime >= 6:00

and system clocktime < 7:00

and tank ARADCE01 level >= 4.77

then pump ETAB141 status is closed

priority 10

Rule 33

if system clocktime >= 6:00

and system clocktime < 7:00

and tank ARADCE01 level <= 4.65

then pump ETAB141 status is open

priority 10

Rule 34

if system clocktime >= 7:00

and system clocktime < 7:01

and tank ARADCE01 level >= 4.7

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 40

if system clocktime >= 7:01

and system clocktime < 9:00

and tank ARADCE01 level >= 4.98

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 41

if system clocktime >= 7:01

and system clocktime < 9:00

and tank ARADCE01 level <= 3.07

then pump ETAB120 status is open

priority 10

Rule 42

if system clocktime >= 7:00

and system clocktime < 9:00

and tank ARADCE01 level >= 4.98

then pump ETAB141 status is closed

priority 10

Rule 43

if system clocktime >= 7:00

and system clocktime < 9:00

and tank ARADCE01 level <= 2.0

then pump ETAB141 status is open

priority 10

Rule 50

if system clocktime >= 9:00

and system clocktime < 12:00

and tank ARADCE01 level >= 2.74

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 51

if system clocktime >= 9:00

and system clocktime < 12:00

and tank ARADCE01 level <= 2.01

then pump ETAB120 status is open

priority 10

Rule 52

if system clocktime >= 9:00

and system clocktime < 12:00

and tank ARADCE01 level >= 4.98

then pump ETAB141 status is closed

priority 10

Rule 53

if system clocktime >= 9:00

and system clocktime < 12:00

and tank ARADCE01 level < 2.0

then pump ETAB141 status is open

priority 10

Rule 60

if system clocktime >= 12:00

and system clocktime < 18:00

and tank ARADCE01 level >= 4.98

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 61

if system clocktime >= 11:59

and system clocktime < 18:00

and tank ARADCE01 level <= 2.61

then pump ETAB120 status is open

priority 10

Rule 62

if system clocktime >= 17:00

and system clocktime < 18:00

and tank ARADCE01 level >= 4.98

then pump ETAB141 status is closed

priority 10

Rule 63

if system clocktime >= 17:00

and system clocktime < 18:00

and tank ARADCE01 level < 2.68

then pump ETAB141 status is open

priority 10

Rule 70

if system clocktime >= 18:00

and system clocktime < 21:00

and tank ARADCE01 level >= 3.39

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 71

if system clocktime >= 18:00

and system clocktime < 21:00

and tank ARADCE01 level <= 2.03

then pump ETAB120 status is open

priority 10

Rule 80

if system clocktime >= 21:00

and system clocktime < 24:00

and tank ARADCE01 level >= 3.26

then pump ETAB120 status is closed

priority 10

Rule 81

if system clocktime >= 21:00

and system clocktime < 24:00

and tank ARADCE01 level <= 2.03

then pump ETAB120 status is open

priority 10

ANEXO F

RESULTADOS OBTIDOS PARA OS DIFERENTES CENÁRIOS ABORDADOS

A. Cenário de Alteração do Nível Mínimo de Água no Reservatório

Tabela F 1. Número de bombas necessárias em cada período de tarifário de energia e percentagem de utilização para o cenário de alteração do nível mínimo de água no reservatório.

Período	Hora inicial	Hora final	Nº horas período	Nº de bombas necessárias	Factor de Utilização (%)		Custo (€)	
					Bomba 1	Bomba 2	Bomba 1	Bomba 2
1	00:00	02:00	2	2	100,0	18,7	143,7	26,7
2	02:00	06:00	4	2	100,0	30,1	268,2	79,2
3	06:00	07:00	1	2	100,0	0,05	71,8	0,8
4	07:00	09:00	2	1	71,1	0,0	150,1	0
5	09:00	12:00	3	1	10,3	0,0	40,8	0
6	12:00	00:00	12	1	91,8	0,0	1162,9	0

Tabela F 2 Resultados obtidos para o nível de água inicial e final no reservatório para cada período, para o dia 8 de Julho de 2008, para o cenário de alteração do nível mínimo de água no reservatório.

Período	Hora inicial	Hora final	Nº horas período	Nível de Água Inicial (m)	Nível de Água Final (m)
1	00:00	02:00	2	1,50	1,50
2	02:00	06:00	4	1,50	3,67
3	06:00	07:00	1	3,67	4,98
4	07:00	09:00	2	4,98	4,98
5	09:00	12:00	3	4,98	1,50
6	12:00	24:00	12	1,50	1,50

B. Cenário de Ter um dos Reservatórios em Manutenção

Tabela F 3. Número de bombas necessárias em cada período de tarifário de energia e percentagem de utilização para o cenário de estar um dos reservatórios em manutenção.

Período	Hora inicial	Hora final	Nº horas período	Nº de bombas necessárias	Factor de Utilização (%)		Custo (€)	
					Bomba 1	Bomba 2	Bomba 1	Bomba 2
1	00:00	02:00	2	2	100,0	18,8	143,7	26,8
2	02:00	06:00	4	2	100,0	18,2	268,2	48,5
3	06:00	07:00	1	1	91,7	0,0	65,8	0
4	07:00	09:00	2	1	71,1	0,0	150,1	0
5	09:00	12:00	3	1	28,3	0,0	111,7	0
6	12:00	00:00	12	1	91,8	0,0	1163,2	0

Tabela F 4. Resultados obtidos para o nível de água inicial e final no reservatório para cada período, para o dia 8 de Julho de 2008, para o cenário de estar um dos reservatórios em manutenção.

Período	Hora inicial	Hora final	Nº horas período	Nível de Água Inicial (m)	Nível de Água Final (m)
1	00:00	02:00	2	2,00	2,00
2	02:00	06:00	4	2,00	2,98
3	06:00	07:00	1	2,98	4,98
4	07:00	09:00	2	4,98	4,98
5	09:00	12:00	3	4,98	2,00
6	12:00	24:00	12	2,00	2,00

C. Cenário de Aumento do Rendimento dos GE's

Tabela F 5 Número de bombas necessárias em cada período de tarifário de energia e percentagem de utilização para o cenário de aumento do rendimento dos GE's.

Período	Hora inicial	Hora final	Nº horas período	Nº de bombas necessárias	Factor de Utilização (%)		Custo (€)	
					Bomba 1	Bomba 2	Bomba 1	Bomba 2
1	00:00	02:00	2	2	100,0	18,8	140,2	26,2
2	02:00	06:00	4	2	100,0	26,6	261,8	69,1
3	06:00	07:00	1	1	100,00	0,0	70,1	0
4	07:00	09:00	2	1	71,1	0,0	146,6	0
5	09:00	12:00	3	1	14,9	0,0	57,2	0
6	12:00	00:00	12	1	91,8	0,0	1135,5	0

Tabela F 6 Resultados obtidos para o nível de água inicial e final no reservatório para cada período, para o dia 8 de Julho de 2008, para o cenário de aumento do rendimento dos GE's.

Período	Hora inicial	Hora final	Nº horas período	Nível de Água Inicial (m)	Nível de Água Final (m)
1	00:00	02:00	2	2,00	2,00
2	02:00	06:00	4	2,00	2,98
3	06:00	07:00	1	2,98	4,98
4	07:00	09:00	2	4,98	4,98
5	09:00	12:00	3	4,98	2,00
6	12:00	24:00	12	2,00	2,00